



**ANDRÉ OLIVEIRA SANCHES**

LICENCIADO

**Integração de dados de sondagens e desmontes para a  
construção de um modelo geológico de um depósito mineral  
filoniano**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica (Georrecursos)

Orientador: Doutor José António de Almeida,

Prof. Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL

Co-Orientador: Doutor Paulo do Carmo Sá Caetano,

Prof. Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL

Júri:

Presidente: Dr.<sup>a</sup> Maria da Graça Azevedo de Brito

Orientador: Dr. José António Almeida

Vogal: Dr. Romeu André Carvalho Vieira



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2015

# **INTEGRAÇÃO DE DADOS DE SONDAGENS E DESMONTES PARA A CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOLÓGICO DE UM DEPÓSITO MINERAL FILONIANO**

Copyright em nome de André Oliveira Sanches, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## AGRADECIMENTOS

Tantas palavras me ocorrem neste momento e nenhuma parece a mais certa para expressar o que realmente é sentido. Um percurso de 5 anos que me fez cruzar com muitas caras e corações, muitas palavras, opiniões, certos e errados, inúmeras experiências que me moldaram e definiram, e me trazem memórias sem fim, de que nunca me esquecerei.

Alguns nomes surgem espontaneamente quando chega a oportunidade de agradecer o apoio e a força, fundamentais, na realização de determinadas tarefas da nossa vida. Assim, deixo os meus sinceros agradecimentos:

À Companhia Mineira, por ceder com tamanha gentileza os dados e por depositar confiança em mim e no meu trabalho. Sem o apoio e disponibilidade desta, a realização do trabalho não seria viável.

Ao Departamento de Geologia e ao Departamento de Planeamento dos Trabalhos Mineiros pelo apoio, disponibilidade e ajuda no desenvolvimento do trabalho e conhecimento da mina.

À Fundação IDNOVA pela oportunidade de trabalhar em vários projetos de diferentes áreas que tanto contribuíram para o meu enriquecimento profissional e pessoal.

À empresa Midland Valley por ter assinado um protocolo educacional com a FCT Universidade NOVA de Lisboa onde disponibiliza gratuitamente o *software* Move®.

Ao Doutor José António Almeida, meu orientador, por ter disponibilidade para todas as minhas perguntas, dúvidas e incertezas, por ser sempre claro e direto, pelo trabalho que me permitiu desenvolver, principalmente, por encontrar uma solução sempre que tudo parecia perdido. Com o professor, aprendi a encontrar as soluções mais práticas e simples, assim como as mais complexas e matemáticas, permitiu-me desenvolver uma série de *hard* e *soft skills* que vão marcar o meu futuro profissional. Um exemplo e uma inspiração.

Ao Doutor Paulo Sá Caetano, por me co-orientar e por todas as oportunidades que me permitiu. Pelo exemplo profissional, pela inteligência social e por me mostrar que nem tudo é preto no branco. Ensinou-me como agarrar oportunidades e, principalmente, como criá-las, desenvolvê-las e tirar proveito, não só profissional, também pessoal. Aprendi ainda que há uma lição em cada frase e que o segredo para o respeito sincero, pode ser a proximidade. Obrigado pela sempre boa disposição e disponibilidade para ensinar.

À Doutora Graça Brito por nos encher o espírito de alegria e boa disposição, pelos ensinamentos, por acreditar em mim e me motivar a fazer mais. Pelo exemplo de proximidade aluno-professor que nos ensina tanto e pela ilimitada disponibilidade para ouvir e ajudar.

Ao Doutor José Carlos Kullberg por tudo o que me ensinou, pelo que me permitiu conhecer e dar a conhecer, pelas ideias e conversas, pelo voto de confiança em tudo, pela lembrança e, principalmente, pela pessoa que me permitiu conhecer.

Ao Doutor Joaquim Simão por se lembrar de mim e por me depositar a sua confiança, pela simpatia e pela juventude que lhe vejo eterna.

Ao Doutor Nuno Leal pelas conversas sempre animadoras e diferentes, pela amizade e, principalmente, pelas palavras constantes de força e motivação.

Ao João Brissos por ser um amigo e um colega inesquecível. Pelos bons momentos e pelas noites no Centro. Por tudo o que me ensinou e por dar asas à minha vontade de criar e fazer diferente. Por ser tão fácil trabalhar ao seu lado, mostrar-lhe ideias e compreender as suas.

Ao Bruno Silva e ao Ricardo Manuel, por serem amigos em todos os momentos, por alimentarem os momentos sérios e de divagação, por me iluminarem as ideias e principalmente por fazerem parte do futuro.

À Daniela Dias por ser o Sol e a Lua, o Mar e a Terra, por me fazer voar e sentir o chão, por ser a minha caixa de segredos e a vontade de falar ao mundo, por ser o meu pilar. Por estar nos momentos mais felizes e menos bons, por me fazer sorrir todos os dias e sonhar acordado. Por existir e preencher de alegria todos os meus dias.

A última palavra fica e permanece para os que estão marcados e preenchem constantemente um lugar em mim, cujo apoio é incondicional e o amor não se quantifica. Aos meus pais e minha irmã, por me lembrarem sempre de que o futuro é construído hoje, por todas as oportunidades e por me acompanharem sem descanso de noite e de dia nos inúmeros caminhos por que me guiaram e pelos que decidi seguir sozinho. Sem eles hoje não estava onde estou, não saberia o que sei e não poderia aprender o que me espera, não tinha acertado tantas escolhas nem sorrido tantas vezes, agradeço o seu amor. Aos meus avós, à tia Graça e ao tio João, por tudo o que me ensinaram e por se mostrarem orgulhosos no que faço e sou.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é testar e propor uma metodologia destinada a apresentar um modelo geológico 3D da morfologia e quantidade de volframite de um depósito mineral, tendo em conta que os dados disponíveis são provenientes de desmontes e sondagens, e têm suportes, informação e tendenciosidade espacial distintos. Estes factos, conjugados, inviabilizam a utilização de metodologias convencionais, e por isso foram desenhadas duas metodologias independentes, uma para a morfologia e outra para a quantidade de volframite.

O modelo morfológico caracteriza a proporção de filão como uma variável aleatória. Primeiro estimou-se por Krigagem a proporção de filão em grandes blocos (50x50x30m) só com os dados das sondagens. Depois simularam-se os blocos numa malha de maior resolução: (a) primeiro os blocos homólogos aos da malha de 50x50x30m com sondagens, por Simulação Sequencial Direta (SSD) com médias locais e (b) depois os restantes blocos, sem médias locais.

Para o modelo de quantidade de volframite (QW) utilizaram-se medições dos desmontes e as classes de quantidade obtidas nas sondagens. Relacionou-se esta informação, reduzindo as classes de QW a duas: QW altos e QW baixos. Estimou-se a probabilidade de cada classe em cada bloco por Krigagem da Indicatriz (KI). Aplicou-se a SSD, com histogramas locais por nível, para obter a distribuição local da QW condicional às duas classes. Combinaram-se as distribuições condicionais de QW com as probabilidades obtidas pela KI, tendo-se obtido as distribuições locais de QW, que incorporam a informação das sondagens e desmontes. Finalmente simulou-se a QW para todo o depósito com o algoritmo Simulação *P-field*. Todo o modelo é feito na malha de blocos 10x10x2m.

As imagens da morfologia e da quantidade de volframite foram combinadas no final para determinar a quantidade de volframite em toneladas do depósito. Os resultados finais são apresentados na malha de blocos 10x10x10m.

**Palavras-chave:** Modelo morfológico; modelo de quantidade de volframite; simulação geoestatística, matérias-primas críticas.



## ABSTRACT

The objective of the present work is to propose and test a methodology to build a 3D geological model of the morphology and wolframite content of a mineral deposit. The proposed methodology was developed taking into account that the data are derived from two different sources, boreholes and stopes, with different sampling sizes and reported information, and with spatial bias. These facts deem unfeasible the use of traditional straightforward approaches and, for that reason, two independent methodologies are suggested: one for the morphology and another for the content in wolframite.

The morphological model maps the volumetric proportion of veins as a random variable. Firstly, the proportion of veins variable was estimated by kriging in large grid blocks of 50x50x30m based solely on borehole data. Subsequently, the proportion of veins was simulated by Direct Sequential Simulation (DSS) in a higher resolution grid following two steps: (a) first, only for the homologous blocks of the 50x50x30m grid containing boreholes, and locally conditioned to the proportion of veins previously estimated with local kriging averages (b) second, simulating the remaining blocks without local conditioning to secondary information.

For the construction of the wolframite content model, the wolframite content classes measured in stopes and from borehole data were used. Firstly, these two measurements of wolframite classes were compared and correlated, and the results simplified into two classes: high content and low content. The probability of each block belonging to each class is estimated by indicator kriging (IK). Direct Sequential Simulation was then used to generate images of wolframite content conditioned to the aforementioned classes and to regional histograms of wolframite content by classes and by mine levels. Using the simulation results, for each block a conditional distribution function of wolframite content was calculated and conditioned to each class. Later, a composite local distribution function of wolframite content was computed by merging the local distributions with the IK estimated probabilities. Finally, the wolframite content was simulated by using the Probability Field Simulation algorithm. The whole model was developed in a 10x10x20m block grid.

Lastly, the simulated morphology images were combined with those of the wolframite content aiming at obtaining the tonnage of wolframite. The final obtained results are presented for the entire mineral deposit in a grid of 10x10x10m blocks.

**Key-words:** Morphological model; wolframite quantity model; geostatistical simulation, critical raw-materials.





# Índice Geral

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e Motivação do Estudo.....	1
1.2 Organização do Trabalho .....	3
<b>2. A MINA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Enquadramento Geográfico.....	5
2.2 Enquadramento Geológico .....	6
2.2.1 Geologia .....	6
2.2.2 Geologia local.....	7
2.2.3 Contexto estrutural .....	10
2.2.4 Génese dos filões.....	11
2.2.5 Morfologia do campo filoniano.....	12
2.2.6 Mineralização e paragénese.....	14
2.3 Dados de Prospeção e Exploração.....	15
2.3.1 Sondagens.....	16
2.3.2 Desmontes .....	18
<b>3. MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
3.1 Estado da Arte .....	23
3.2 Descrição de Suporte das Ferramentas Geoestatísticas Utilizadas Neste Trabalho .....	27
3.2.1 Análise estrutural.....	27
3.2.2 Previsão .....	29
3.3 Metodologia.....	33
3.3.1 Modelo morfológico da proporção de filão.....	35
3.3.2 Modelo de quantidade de volframite.....	39
<b>4. CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>43</b>
4.1 Apresentação dos Dados e Malha de Blocos.....	43
4.1.1 Desmontes .....	43

4.1.2	Sondagens.....	44
4.1.3	Malha de blocos final .....	45
4.2	Estatística Univariada.....	46
4.2.1	Desmontes .....	46
4.2.2	Sondagens.....	50
4.3	Morfologia.....	55
4.3.1	Definição da malha de blocos, variografia e histograma global da PF <sup>S</sup> .....	56
4.3.2	Krigagem da PF <sup>S</sup> na malha 50x50x30 m.....	57
4.3.3	Desagrupamento e variografia da PF <sup>D</sup> na malha 10x10x2 m .....	58
4.3.4	1ª fase da SSD e correção das médias na malha 10x10x2 m.....	60
4.3.5	2ª fase da SSD na malha 10x10x2 m e modelo final de PF.....	60
4.4	Quantidade de volframite .....	67
4.4.1	Análise da correlação entre a quantidade de volframite nos desmontes e as classes de quantidade de volframite das sondagens .....	67
4.4.2	Krigagem da Indicatriz das classes agrupadas na malha 50x50x30 m.....	69
4.4.3	SSD da quantidade de volframite condicionados a C <sub>1</sub> e C <sub>2</sub> com histogramas por nível na malha 10x10x2m.....	71
4.4.4	Geração das leis de distribuição da quantidade de volframite para cada bloco da malha	73
4.4.5	Simulação das imagens finais de quantidade de volframite na malha de 10x10x2m e modelo final.....	74
4.5	Avaliação do Potencial Mineral do Depósito .....	79
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>83</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>89</b>

# Índice de Figuras

Figura 1.1 – Mapeamento da importância económica e risco de abastecimento das 54 matérias-primas estudadas, com identificação de 20 matérias-primas críticas. Adaptado de European Commission (2014). .....	2
Figura 2.1 – Enquadramento geográfico da mina. Adaptado de Valente & Figueiredo (2008). .....	5
Figura 2.2 - Localização dos sectores e enquadramento legal da Companhia Mineira. Adaptado de Pinto et al. (2014). .....	6
Figura 2.3 – Localização dos depósitos de W e Sn da província metalogenética estanho-tungstífera da zona Centro e Norte de Portugal. Adaptado de Ribeiro & Pereira (1982) e Martins (2012), à esquerda e direita, respectivamente. ....	7
Figura 2.4 - Excerto da Carta Geológica de Portugal à escala 1: 500.000 dos Serviços Geológicos de Portugal (Lisboa, 5ª edição, 1992). Adaptado de Pinto (2014). ....	8
Figura 2.5 - Corte geológico esquemático da mina. Adaptado de Thadeu (1979) <i>in</i> Pinto (2014). ....	9
Figura 2.6 – Relação das ocorrências minerais com as fases de formação da rocha granítica. ....	9
Figura 2.7 – Enquadramento das falhas principais identificadas na envolvente da mina. Adaptado de Pinto (2014). ....	10
Figura 2.8 – Esquema da formação do diaclasamento sub-horizontal derivado da intrusão do granitoide pós-tectónico. Adaptado de Ribeiro & Pereira (1982). ....	11
Figura 2.9 - Filões sub-horizontais em “rabo de enguia” (esquerda) e filões do tipo “ligal” (direita). Adaptado de Pinto (2014). ....	13
Figura 2.10 - Filões de “Seixo Bravo”. Retirado de Pinto (2014). ....	13
Figura 2.11 - Exemplo de um "roto", cavidade onde se podem encontrar minerais bem cristalizados. ....	14
Figura 2.12 - Paragéneses dos minerais do depósito e respetiva sequência de deposição. Adaptado de Kelly e Rye (1979). ....	15
Figura 2.13 - Máquina de sondagem de prospecção (esquerda) e coroa diamantada (direita). ....	16
Figura 2.14 - Caixa de sondagem. Fotografia do autor. ....	17
Figura 2.15 - Dimensão da caixa de sondagem e manobra (esquerda), medição de rocha encaixante e filão (direita cima) e categorização mineralógica do filão (direita baixo). ....	17
Figura 2.16 – Perfil esquemático da mina. Adaptado de Franco, Vieira & Bunting (2014) e Pinto (2014). ....	18

Figura 2.17 – Vista 3D do desmonte entre as <i>drives</i> 21 e 23 e os painéis 11 e 13. Adaptado de Franco, Vieira & Bunting (2014) e Pinto (2014).....	19
Figura 2.18 - Esquema 3D do método de desmonte em Câmaras e Pilares. ....	20
Figura 2.19 – Projecção em planta das principais galerias da mina por cores conforme o nível da exploração (L0, L1, L2 ou L3) (Pinto, 2014). ....	21
Figura 3.1 – Representação em planta no plano XoY de um hipotético conjunto de amostras onde se mostra o ângulo azimutal $\alpha$ e a distância $h$ do vetor que liga um qualquer par de pontos. ....	28
Figura 3.2 - Representação gráfica dos pontos de um variograma experimental para uma dada direcção e significado do efeito de pepita, patamar e amplitude. ....	29
Figura 3.3 - Fluxograma com a metodologia destinada à construção do modelo morfológico do depósito mineral da mina. ....	35
Figura 3.4 - Fluxograma com a metodologia destinada à construção do modelo de quantidade de volframite do depósito mineral da mina. ....	41
Figura 4.1 - Malha de blocos no suporte dos desmontes (10x10x2 m). ....	44
Figura 4.2 - Malha de blocos no suporte das sondagens (50x50x30 m). ....	45
Figura 4.3 - Histogramas cumulativos da possança nos desmontes por nível L0, L1, L2 e L3 e global. ....	47
Figura 4.4 - Histogramas cumulativos de $PF^d$ calculados nos desmontes por nível L0, L1, L2 e L3 e global. ....	48
Figura 4.5 - Histogramas cumulativos de quantidade de volframite nos desmontes por nível L0, L1, L2 e L3 e global. ....	49
Figura 4.6 - Histogramas cumulativos da possança dos filões intersectados pelas sondagens por nível L0, L1, L2 e L3 e global. ....	51
Figura 4.7 - Histogramas cumulativos da variável $PF^s$ por nível L0, L1, L2 e L3 e global. ....	52
Figura 4.8 – Histogramas de frequências relativas das classes de quantidade de volframite nas sondagens, por nível L0, L1, L2 e L3 e globais. ....	53
Figura 4.9 - Enquadramento do perfil Px81 e da planta Pz75 no volume da mina. ....	55
Figura 4.10 – Variogramas omnidireccionais da $PF^s$ calculados com a regularização das sondagens apoiada por uma malha de blocos com 10x10x10 m (esquerda) e 20x20x10 m (direita). ....	56
Figura 4.11 – Variogramas experimentais da $PF^s$ para as direcções horizontal e vertical e modelos teóricos ajustados do tipo exponencial. ....	57

Figura 4.12 - Resultados da estimação por KO da PFS. Perfil YoZ (esquerda) e Planta XoY (direita).	58
Figura 4.13 - Resultados do desagrupamento da PF <sup>d</sup> . Perfil YoZ (esquerda) e Planta XoY (direita)...	58
Figura 4.14 - Ajuste dos variogramas <sup>d</sup> da PF <sup>d</sup> para as direções (30;0), (-60;0) e (0;90).	59
Figura 4.15 – Resultados da 1ª fase da SSD#1, ilustração de imagens de uma realização da PF. Perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).	60
Figura 4.16 - Resultados da correção das médias para a imagem SSD #1. Perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).	61
Figura 4.17 – Imagem final simulada como resultado da 2ª fase da SSD #1 da PF. Perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).	61
Figura 4.18 – Visualização em Perfil YoZ (esquerda) e Planta XoY (direita) de três realizações de PF já agrupadas para a malha de 10x10x10m.	62
Figura 4.19 - Ajuste do modelo teórico dos variogramas <sup>d</sup> PF nos variogramas das várias etapas do modelo de PF. Direções (0;0) e (0;90).	63
Figura 4.20 – Representação 3D da imagem média das realizações da PF por SSD na malha de blocos de 10x10x10m. Apenas estão visíveis blocos com valor médio superior a 0,05 (5% de volume em filão).	64
Figura 4.21 – Representação 3D do coeficiente de variação das realizações de PF por SSD na malha de blocos de 10x10x10m. Apenas estão visíveis os 10% de blocos com menor incerteza calculada.	65
Figura 4.22 – Curvas relativas do volume acumulado de filão por proporção de filão, apresentam-se os valores mínimos, médios e máximos das 1000 realizações da PF.	65
Figura 4.23 – Curvas relativas ao volume total de filão (valores mínimos, médio e máximos) por cota da mina.	66
Figura 4.24 – Histogramas condicionais cumulativos da quantidade de volframite reportada nos desmontes às classes de quantidade de volframite reportadas nas sondagens no nível da mina L0.	68
Figura 4.25 – Histogramas condicionais cumulativos da quantidade de volframite reportada nos desmontes às classes de quantidade de volframite reportadas nas sondagens por nível da mina L0, L1, L2 e L3.	68
Figura 4.26 – Variogramas experimentais e modelo teórico ajustado à variável indicatriz definida com base nas duas classes de quantidade de volframite C <sub>1</sub> e C <sub>2</sub> reportados nas sondagens para as direções (0;0) e (0;90).	70

Figura 4.27 – Resultado da KI para os dois conjuntos de classes $C_1$ e $C_2$ . Perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).....	70
Figura 4.28 – Variogramas experimentais da quantidade de volframite reportada nos desmontes e modelo teórico do variogramas <sup>d</sup> para as direções horizontal (0;0) e vertical (0;90). ....	72
Figura 4.29 – Resultado da SSD #1 da quantidade de volframite condicional às classes $C_1$ e $C_2$ em perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita). ....	72
Figura 4.30 - Ajuste do modelo teórico dos variogramas <sup>d</sup> da quantidade de volframite nos variogramas das DSS da Cl1 e Cl2. Direções (0;0) e (0;90). ....	73
Figura 4.31 – Histogramas cumulativos de quantidade de volframite construídos com os valores das 200 realizações para um bloco da malha de blocos (esquerda) $C_1$ , (direita) $C_2$ e histograma cumulativo compósito obtido por Monte Carlo.....	74
Figura 4.32 – Ilustração do procedimento da PFS: imagem de valores Gaussianos gerada por SSG #1, transformação para lei uniforme #1 e imagem de quantidade volframite gerada por PFS #1. Perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).....	75
Figura 4.33 – Resultados finais do modelo de quantidade de volframite para a malha 10x10x10, perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).....	77
Figura 4.34 – Representação 3D dos valores médios de 1000 realizações de quantidade de volframite geradas por PFS.....	78
Figura 4.35 – Representação 3D dos coeficientes de variação calculados com base em 1000 realizações de quantidade de volframite geradas por PFS. ....	78
Figura 4.36 – Resultados do cálculo final de quantidade de volframite (kg) para a malha 10x10x10m, perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita). ....	80
Figura 4.37 – Curvas da quantidade total de volframite (ton) por proporção de filão, onde estão representadas as curvas optimista (máximo das simulações), pessimista (mínimo das simulações) e a curva média.....	81
Figura 4.38 – Curvas relativas à quantidade total de volframite (ton) por cota da mina.....	82
Figura 4.39 – Representação 3D da imagem da média das quantidades de volframite (kg) por bloco de 10x10x10m.....	82

# Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Geometria da malha de blocos 10x10x2 m. ....	44
Tabela 4.2 - Geometria da malha de blocos 50x50x30 m. ....	45
Tabela 4.3 - Geometria da malha de blocos 10x10x10 m. ....	46
Tabela 4.4 - Estatísticos básicos da possança dos filões medida nos desmontes, por nível da mina e global. ....	46
Tabela 4.5 – Estatísticos básicos da variável $PF^d$ calculada nos desmontes. ....	48
Tabela 4.6 – Estatísticos básicos da variável quantidade de volframite amostrada nos desmontes. ....	49
Tabela 4.7 – Estatísticos básicos da possança dos filões intersectados pelas sondagens. ....	50
Tabela 4.8 – Comprimento total das sondagens, possança total dos filões e $PF^S$ média do depósito no suporte das sondagens. ....	51
Tabela 4.9 – Estatísticos básicos da variável $PF^S$ já regularizada com apoio da malha de blocos 50x50x30m por nível e global. ....	52
Tabela 4.10 – Estatísticos das classes de quantidade de volframite por nível e globais medidas nas sondagens, onde se inclui a possança acumulada e a possança média. ....	54
Tabela 4.11 – Parâmetros de cálculo e ajuste do variograma da $PF^S$ . ....	57
Tabela 4.12 – Parâmetros de cálculo e ajuste do variograma <sup>d</sup> da $PF^d$ . ....	59
Tabela 4.13 – Parâmetros de cálculo e ajuste do variograma das classes de quantidade de volframite segundo uma variável do tipo indicatriz. ....	69
Tabela 4.14 – Parâmetros de cálculo e ajuste do variograma <sup>d</sup> da quantidade de volframite. ....	71
Tabela 4.15 – Tabela de comparação dos estatísticos básicos entre a quantidade de volframite dos desmontes e a quantidade de volframite de uma imagem simulada por PFS. ....	76





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO DO ESTUDO

A exploração de depósitos minerais na União Europeia (UE) é essencial para garantir o abastecimento sustentável das necessidades da sociedade Europeia. É pois necessário assegurar investimento para a prospeção, caracterização e exploração dos depósitos minerais, sem o qual a Europa será sempre dependente de países terceiros com todos os riscos geoestratégicos associados.

Com o objetivo de perceber a dependência da Europa em termos de matérias-primas, 41 minerais e metais foram estudados de forma a serem classificados como matérias-primas “críticas” por um “Grupo de Trabalho *Ad-hoc* da Comissão Europeia”. O primeiro documento foi publicado em 2010 e assume o conceito de “crítico” pesando o risco de abastecimento (*supply risk*) e os impactos na economia (*economic importance*). Foram ainda considerados dois tipos de riscos na avaliação: o risco no abastecimento (estabilidade político-económica do produtor, substituição e reciclagem) e risco ambiental. Em 2013, o estudo é actualizado, aumentando o número de matérias-primas para 54, que, com base nos fatores de risco e importância apresentados, resultam em 20 matérias-primas “críticas” (Figura 1.1), de onde se destaca o tungsténio que em Portugal tem sido historicamente explorado em várias minas das regiões Norte e Centro.

O objetivo do presente trabalho é apresentar um modelo 3D da morfologia e da quantidade de volframite de um depósito mineral amostrado por sondagens e desmontes. A este propósito refere-se que se trata de um trabalho académico, sem qualquer ligação à Companhia Mineira, excepto a autorização para usar e interpretar os dados da mina, e não é pretendido declarar ou avaliar possíveis recursos/reservas de acordo com *standards* internacionais, nem existiu qualquer pedido expresso da Companhia Mineira para a produção do trabalho académico. Como tal, por motivos de confidencialidade vários resultados encontrar-se-ão distorcidos por uma fórmula ou factor.

A mina é uma exploração mineira com um histórico de informação sem paralelo em Portugal e uma impressionante coleção de dados de sondagens, de levantamentos geológicos e de quantidades de volframite na mina. Refira-se que à data são muito poucos os trabalhos publicados com metodologias geoestatísticas aplicados ao depósito mineral, e uma das razões é a dificuldade em encontrar variogramas das variáveis de estudo (Simões, 2015).

A mina explora volframite como mineral principal de tungsténio que ocorre numa complexa rede em filões quartzosos. A modelação da morfologia consiste em caracterizar a 3D a proporção de filão que ocorre em cada bloco. No que concerne à quantidade de volframite, o modelo quantifica espacialmente uma variável quantidade de volframite que representa a quantidade de volframite que ocorre na fração do filão ( $\text{kg/m}^3$ ). Estes dois sub-modelos, modelo da morfologia e modelo de quantidade de volframite, foram construídos de forma independente sendo no final cruzados para a quantificação do

potencial mineral (quantidade de volframite em toneladas). O desenho das metodologias foi condicionado pela informação disponível (sondagens e desmontes, com suportes, tendenciosidade espacial e informação reportada distinta) sendo por isso do tipo *data driven approach*. As características muito particulares dos dados revelaram a impossibilidade de aplicação dos métodos geoestatísticos usuais de forma convencional, tornando-se necessário estudar formas de conciliar os dados e a sua intervenção condicionante nos modelos.

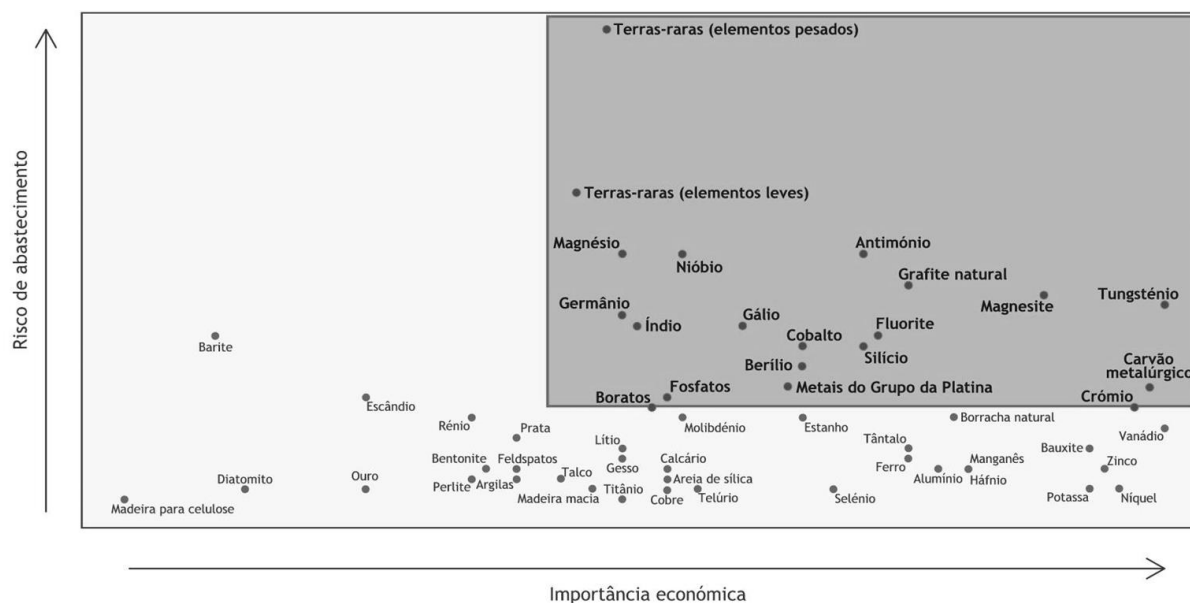


Figura 1.1 – Mapeamento da importância económica e risco de abastecimento das 54 matérias-primas estudadas, com identificação de 20 matérias-primas críticas. Adaptado de European Commission (2014).

A abordagem desenvolvida quer para a morfologia – proporção de filão – quer para a quantidade de volframite – quantidade de volframite no volume de filão – foi do tipo simulação estocástica. Esta abordagem revelou-se totalmente adequada para a integração de dados de sondagens e desmontes, com suportes, informação registada e tendenciosidade espacial distintas. As metodologias baseadas em simulação estocástica tem como principal característica gerarem vários cenários com a mesma probabilidade de ocorrência, que permitem estimar a incerteza local da variável em estudo e, simultaneamente, obter uma imagem média aproximada à que seria obtida por um processo de estimação por krigagem (Soares, 2006; Charifo *et al.*, 2013). Constituem por isso ferramentas aptas a poderem ser utilizadas no estudo do potencial mineral.

Em termos dos programas informáticos foram utilizados o geoMS (variografia, krigagem e visualização 2D) e o Move® da empresa Midland Valley (visualização 3D). Todos os cálculos auxiliares, como a regularização de sondagens, e os cálculos sobre as malhas de blocos foram escritos em linguagem de programação Visual Basic 2010 numa aplicação dedicada.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se organizado em 6 capítulos.

O capítulo 1 refere-se à introdução do tema abordado e aos motivos que levaram ao desenvolvimento dos trabalhos descritos na dissertação, enquadrando o estudo no contexto social e económico atual.

No capítulo 2 descreve-se o depósito no contexto geográfico, geológico e de exploração mineira. Do ponto de vista geológico descreve-se a geologia no contexto, regional e local, destacando-se os mecanismos de génese e a morfologia dos filões, terminando com os processos e paragénese da mineralização. Do ponto de vista da mina descrevem-se os métodos de exploração, prospeção e recolha de dados, no suporte das sondagens e do desmonte.

O capítulo 3 é introduzido com o estado de arte do estudo desenvolvido no contexto das aplicações geoestatísticas similares, seguindo-se a explicação teórica das duas metodologias desenvolvidas para dar resposta ao problema apresentado. Termina-se com a descrição dos métodos geoestatísticos de suporte à criação do modelo tridimensional da morfologia e de quantidade de volframite do depósito.

O capítulo 4 foca-se na apresentação e discussão dos resultados obtidos em cada etapa de cada metodologia aplicada, modelo morfológico e modelo de quantidade de volframite, e do resultado do cruzamento dos modelos, de forma a estimar a quantidade de volframite em toneladas do depósito. Os resultados são apresentados sobre a forma de gráficos e imagens georreferenciadas.

Por último, no capítulo 5, tecem-se as considerações finais sobre o trabalho no seu conjunto, concluindo-se com uma breve reflexão sobre desenvolvimentos futuros. No capítulo 6 listam-se as referências bibliográficas.



## 2. A MINA

### 2.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

A Concessão da Mina localiza-se na região da Beira Baixa, a poente da cidade do Fundão e a sudoeste da Covilhã (Figura 2.1). Com a área aproximada de 19.1 km<sup>2</sup>, situa-se em pleno Maciço Hespérico, a Sul da Serra da Estrela, mais precisamente na Serra do Açor.

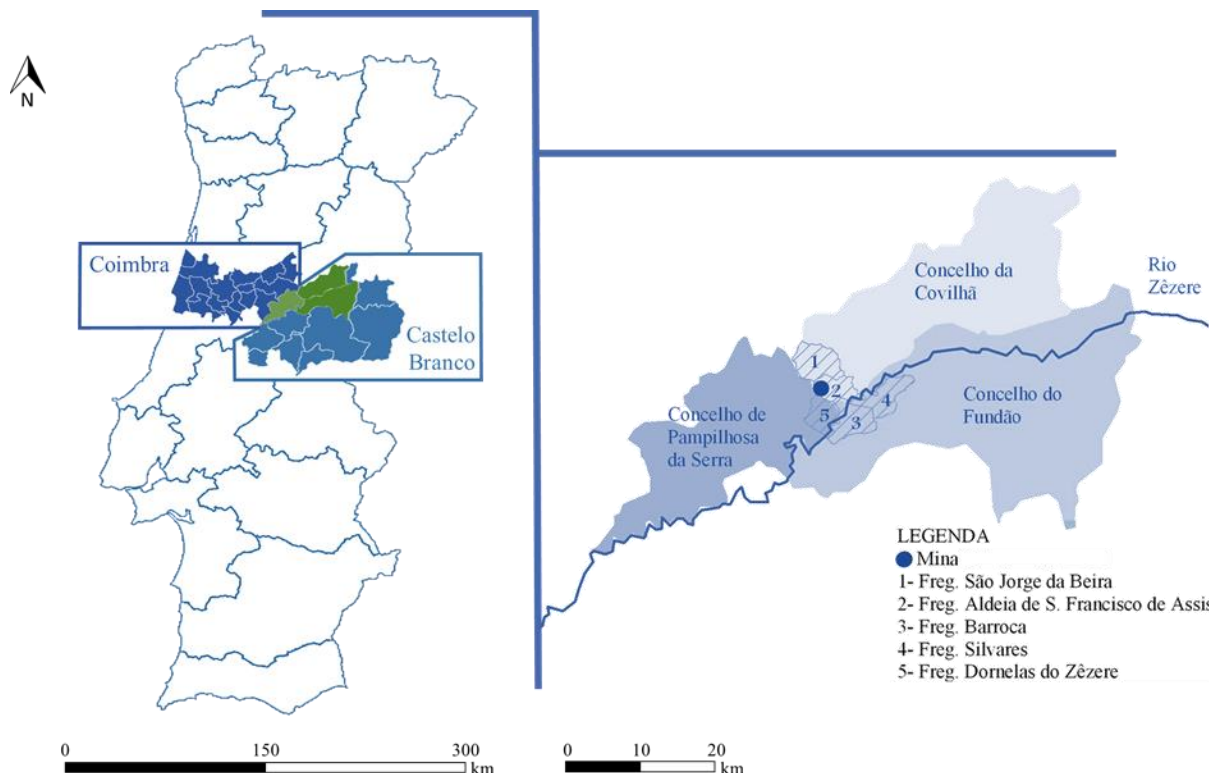


Figura 2.1 – Enquadramento geográfico da mina. Adaptado de Valente & Figueiredo (2008).

A concessão mineira (Figura 2.2 – linha verde) é condicionada a Sudeste pelo rio Zêzere. A topografia é bastante acidentada, em parte devido à região ser xistenta, originando grandes amplitudes de cotas, de 350 a 1083 m (Pinto, 2014) e linhas de água muito cavadas. A maioria das águas de superfície drenam para o rio Zêzere. Para além da área de concessão, a Companhia Mineira também possui direitos de prospeção e pesquisa sobre uma área com cerca de 68 km<sup>2</sup> delimitada a cor vermelha na Figura 2.2, actualizada para 16,3 km<sup>2</sup> em 2015 (Março).

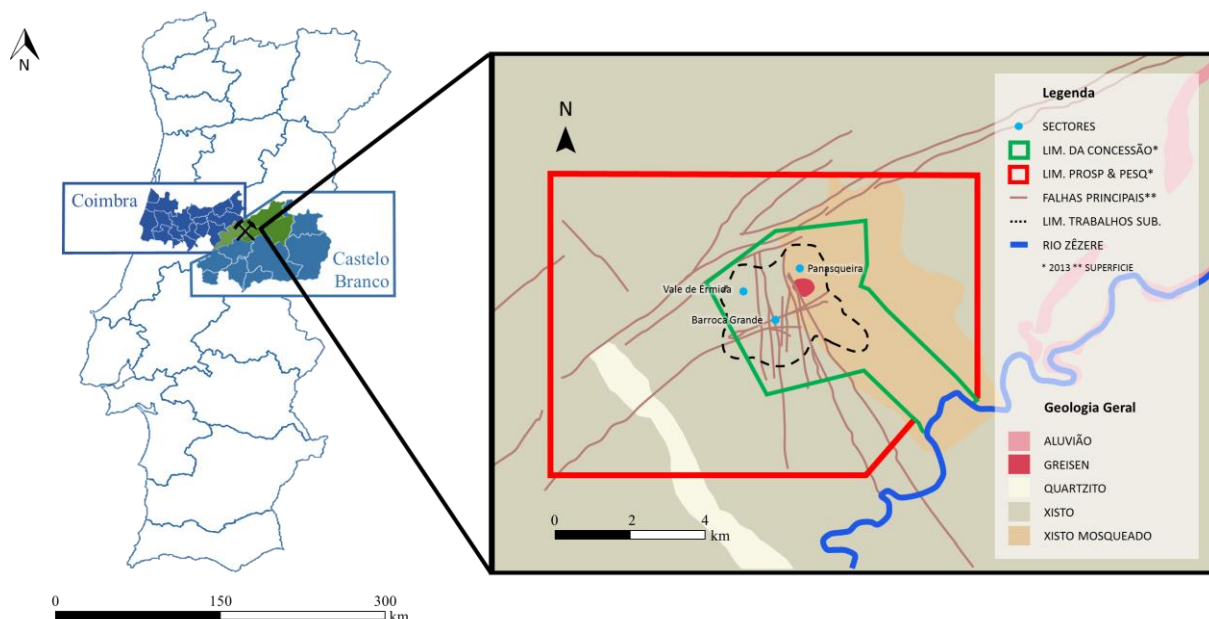


Figura 2.2 - Localização dos sectores e enquadramento legal da Companhia Mineira. Adaptado de Pinto et al. (2014).

Em termos rodoviários, a área mineira está ligada por estrada aos portos de Leixões (224 km) e Aveiro (173 km), que são os principais pontos de exportação dos concentrados produzidos.

## 2.2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

### 2.2.1 GEOLOGIA

Em termos regionais, a mina explora uma mineralização que se desenvolve sobre a forma de depósitos filonianos na província metalogenética estanho-tungstífera, descrita por Neiva (1944), que se estende por toda a região Centro e Norte de Portugal (Figura 2.3).

No âmbito estrutural, a província, enquadrada na Zona Centro Ibérica, foi alvo de duas fases de deformação principais, D1 e D3. A primeira caracterizada por dobramentos NW-SE, subverticais com xistosidade paralela aos eixos das dobras, e a D3 por dobramentos subverticais, coaxiais a D1, e eixos sub-horizontais (Neiva, 1944; Thadeu, 1977 *In* Pinto, 2014). À última fase descrita associam-se ainda, importantes zonas de cisalhamento e a instalação de grandes massas graníticas, classificadas em Ferreira *et al.* (1982).

A Figura 2.3 permite observar que a distribuição das mineralizações de estanho e volfrâmio são vastas. Conde *et al.* (1971) afirmam que estas mineralizações são condicionadas às estruturas resultantes da formação da Orogenia Varisca e aos afloramentos de granitos contemporâneos, podendo-se ainda identificar associadas a auréolas de metamorfismo, relacionadas com granitos pouco profundos. Um

trabalho feito por Noronha (1999) refere que as mineralizações mais importantes no país estão associadas a cisalhamentos variscos e fracturação resultante da intrusão dos granitos referidos anteriormente.

Em importantes estudos, nomeadamente Thadeu (1965), descreveu que a ocorrência das mineralizações de W e Sn está associada a uma tendência zonal: pegmatitos estaníferos e/ou filões quartzosos estaníferos, filões quartzosos estanho-volframíticos e filões quartzosos volframíticos.

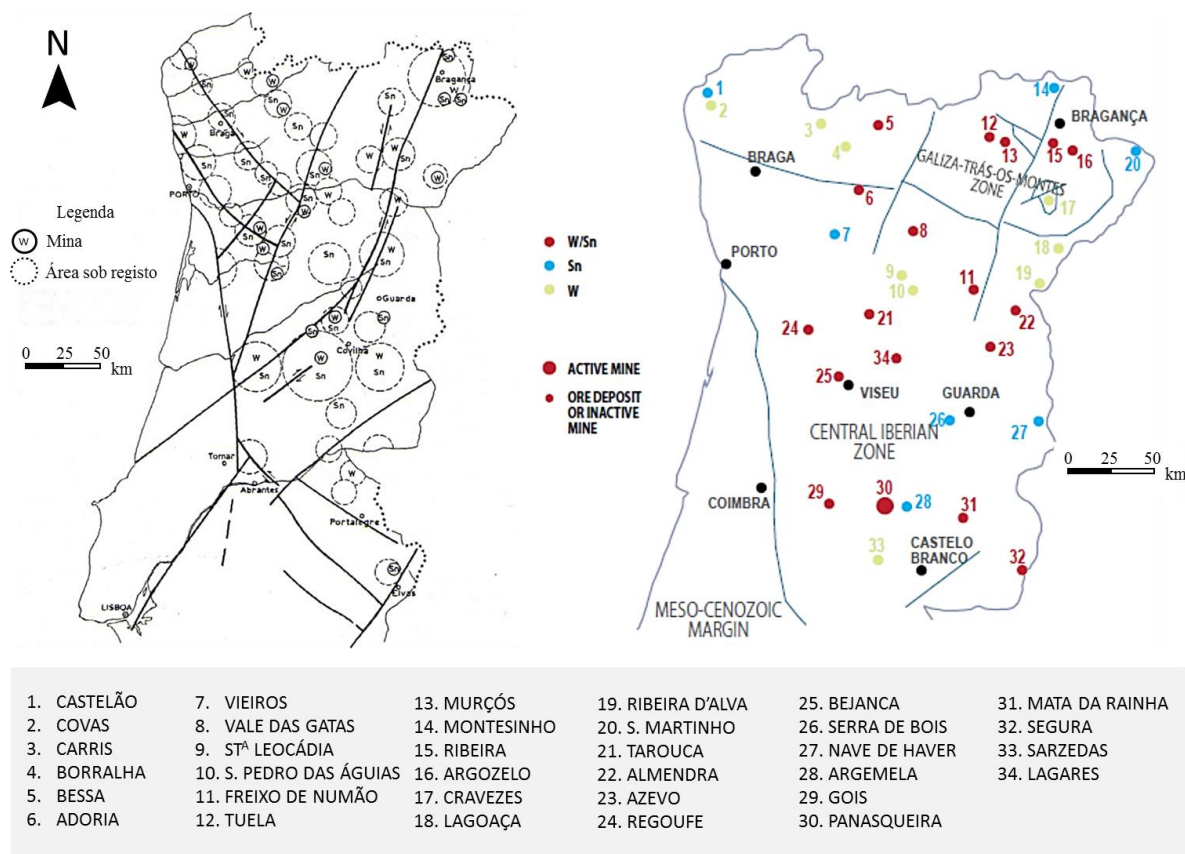


Figura 2.3 – Localização dos depósitos de W e Sn da província metalogenética estanho-tungstífera da zona Centro e Norte de Portugal. Adaptado de Ribeiro & Pereira (1982) e Martins (2012), à esquerda e direita, respectivamente.

## 2.2.2 GEOLOGIA LOCAL

Localmente, a mina encontra-se sobre o complexo xisto-grauvácico (CXG), pertencente ao Grupo das Beiras (

Figura 2.4), que está enquadrado no Maciço Central da Zona Centro Ibérica (ZCI). O Grupo das Beiras (Sousa, 1984), apresenta uma sequência de lentículas finas de origem marinha (pelitos e arenitos), sujeitas a metamorfismo regional de baixo grau (Kelly & Rye, 1979), contemporâneo das fases iniciais de compressão da orogenia Varisca. Para além das formações metasedimentares, encontram-se ainda várias ocorrências eruptivas básicas e ácidas (Thadeu, 1951).

O autor descreve ainda as formações metasedimentares como xistos gresosos, com xistosidade vertical a subvertical, que passam a quartzitos impuros e grauvaques.

A mina intersecta, entre outras (greisen e doleritos), duas litologias principais, classificadas como xistos argilosos e xistos argilosos mosqueados. Segundo Thadeu (1979), os últimos estão associados a maior probabilidade de ocorrência de mineralização, em publicações mais recentes, Pinto (2014), não identifica esta associação nos trabalhos subterrâneos. Estas formações são descritas como pertencentes à idade pré-câmbrica superior (Conde *et al.*, 1971).

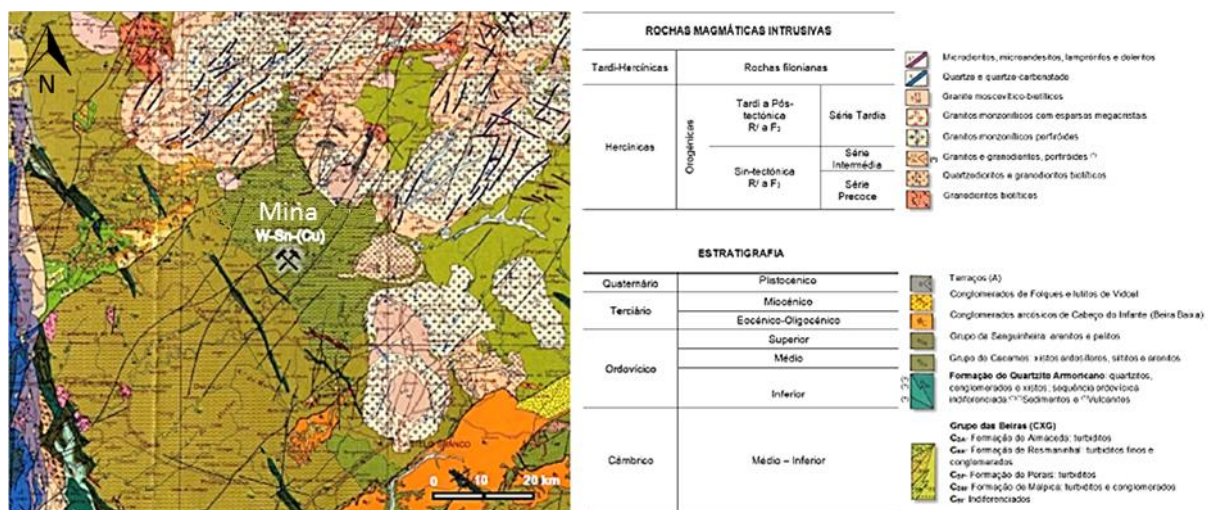


Figura 2.4 - Excerto da Carta Geológica de Portugal à escala 1: 500.000 dos Serviços Geológicos de Portugal (Lisboa, 5ª edição, 1992). Adaptado de Pinto (2014).

Os fenómenos de magmatismo podem ser identificados na zona do depósito sob a forma de rochas básicas intrusivas (diques doleríticos) sub-verticais e filões de quartzo sub-horizontais. São ainda descritos fenómenos de magmatismo ácido, nomeadamente, diques aplíticos e uma intrusão granítica em formato de cúpula, bastante greisenizada e não aflorante (Figura 2.5), intersectada pela primeira vez no final de 1948 (Thadeu, 1951). Este fenómeno é concordante com os xistos argilosos mosqueados (orla de exocontacto com porfiroblastos de biotite-cordierite), referidos anteriormente (Figura 2.5).



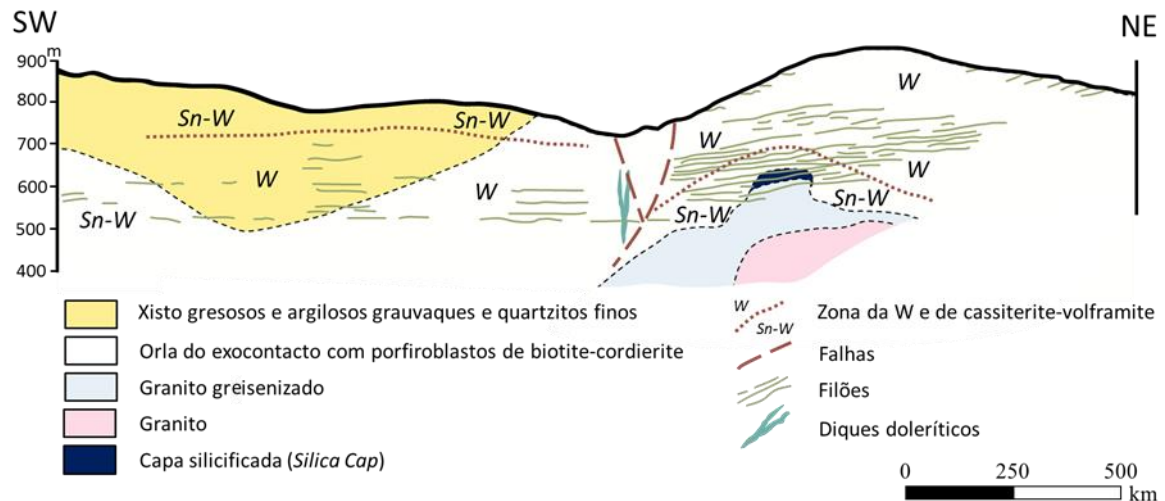


Figura 2.5 - Corte geológico esquemático da mina. Adaptado de Thadeu (1979) in Pinto (2014).

Thadeu (1951) descreve um elevado enriquecimento mineralógico da zona, contemporâneo da intrusão, e relaciona a algumas ocorrências minerais com as fases de formação da rocha granítica (Figura 2.6):

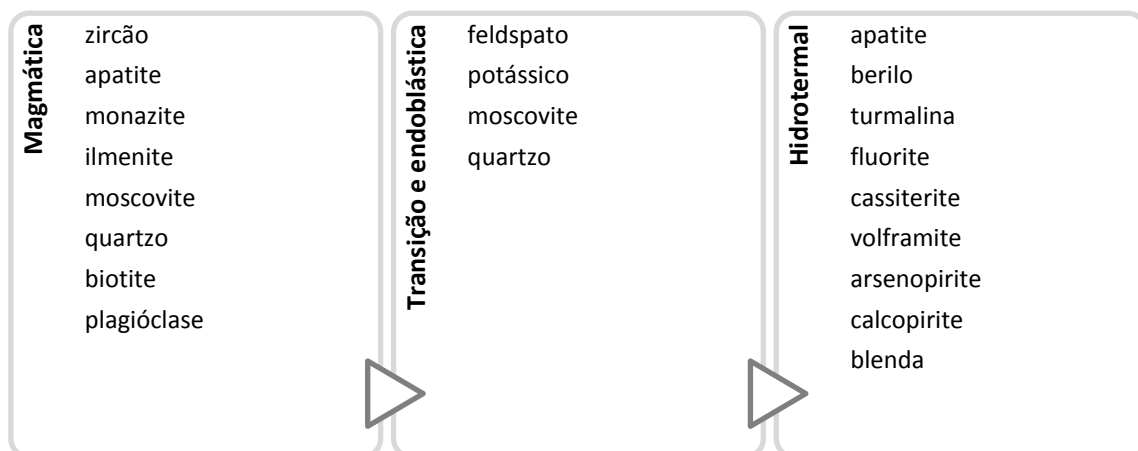


Figura 2.6 – Relação das ocorrências minerais com as fases de formação da rocha granítica.

Mais tarde, Kelly & Rye (1979) relacionam geneticamente as mineralizações hidrotermais de W-Sn e a cúpula de granito greisenizada; esta hipótese é apoiada três anos depois por Ribeiro & Pereira (1982).

### 2.2.3 CONTEXTO ESTRUTURAL

O contexto geológico e estrutural da mina é caracterizado pela existência de um elevado número de descontinuidades, como dobras, falhas e diaclases. Thadeu (1951) caracteriza três famílias principais de falhas: sistema N-S (Falha principal, Falha Poente e Falha do Vale das Freiras), sistema NE-SW (Falha da Cebola) e sistema ENE-WSW (

Figura 2.7). O autor assume todos os sistemas como posteriores à genese do jazigo.

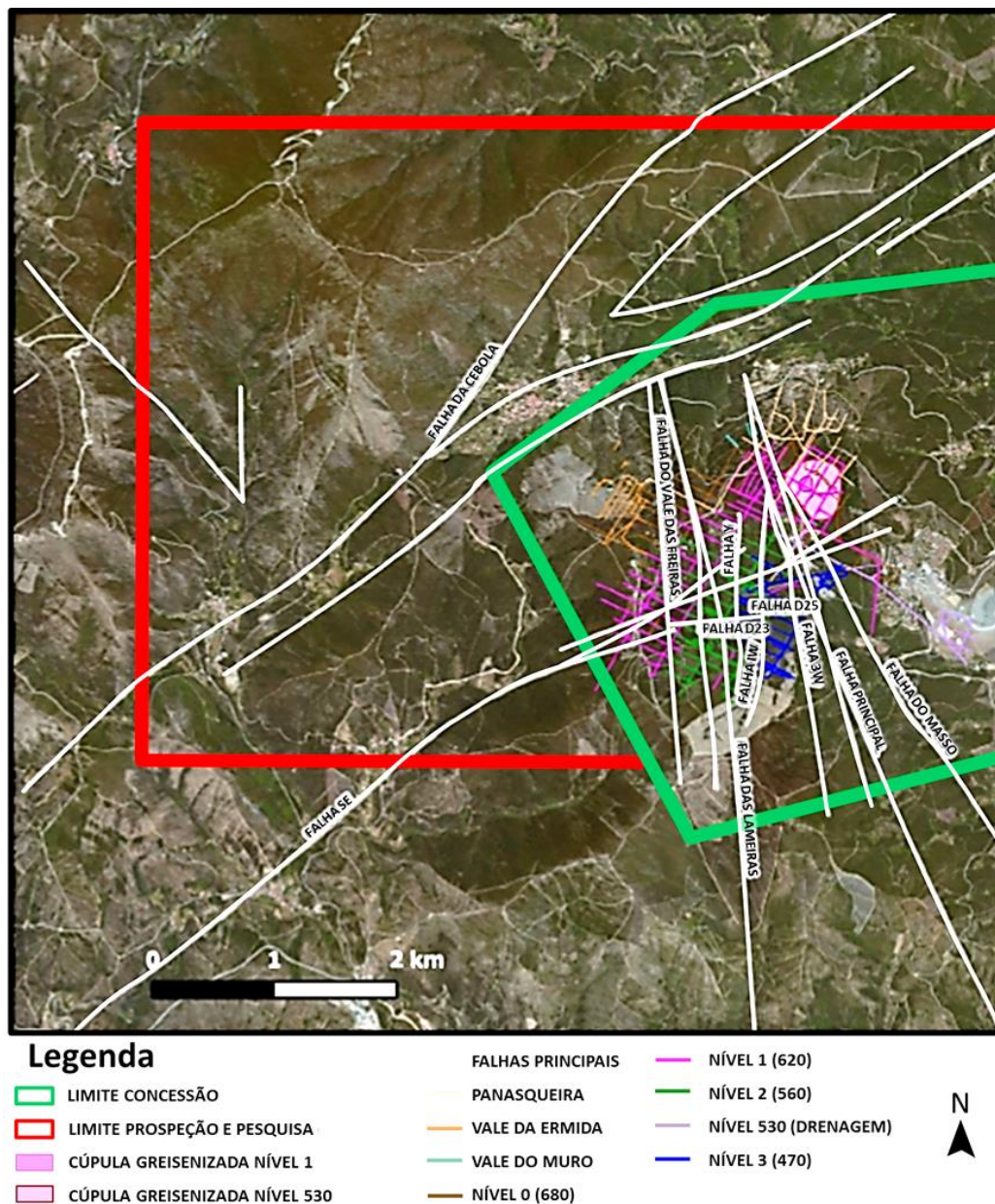


Figura 2.7 – Enquadramento das falhas principais identificadas na envolvente da mina. Adaptado de Pinto (2014).

Por outro lado, Blatter (1985), identifica quatro famílias:

- Falhas originadas por desligamento, com preenchimento argiloso (Falha principal, Falha Poente e Falha do Vale das Freiras);
- Falhas com preenchimento de brecha;
- Falhas com desligamento complexo e preenchimento misto, argiloso e brechóide (Falha 8E e Falha da Cebola);
- Falhas menores com preenchimentos variados.

O sistema N-S é anterior à génese do jazigo, dado apresentar “moscas” no preenchimento, quando intersecta a unidade definida como xistos mosqueados, na proximidade do greisen, e preserva a horizontalidade dos filões mineralizados. Os outros sistemas são posteriores, neste tipo de sistemas foi ainda observado por Pinto (2014) um preenchimento abundante de cassiterite.

Identifica-se ainda no enquadramento do depósito um sistema de diaclasamento, sub-horizontal, de elevada importância, por apresentar as principais mineralizações de Sn-W. A origem do sistema de diaclases é alvo de várias teorias, entre as quais a de Marignac (1973) que propõe a abertura por rotura frágil, aquando da intrusão da cúpula granítica. Por outro lado, Ribeiro & Pereira (1982) defendem que a abertura resulta do desenvolvimento de fendas de tração, durante a primeira fase de deformação varisca. Importantes trabalhos são publicados por Foxford *et al.* (2000).

## 2.2.4 GÉNESE DOS FILÕES

Durante os principais episódios de deformação varisca, na região formaram-se dobramentos muito inclinados, orientados NW-SE, que resultaram em xistosidade, aproximadamente vertical (Ribeiro & Pereira, 1981). Os estiramentos com origem nos dobramentos, desenvolveram o sistema de fracturação sub-horizontal, que Noronha *et al.* (1992), sugerem ter sido preenchido por um quartzo semelhante ao dos atuais filões estéreis (“seixo bravo”). Estes autores defendem ainda, que a horizontalidade dos filões mineralizados é controlada pelo mecanismo de intrusão granítica (Figura 2.8).

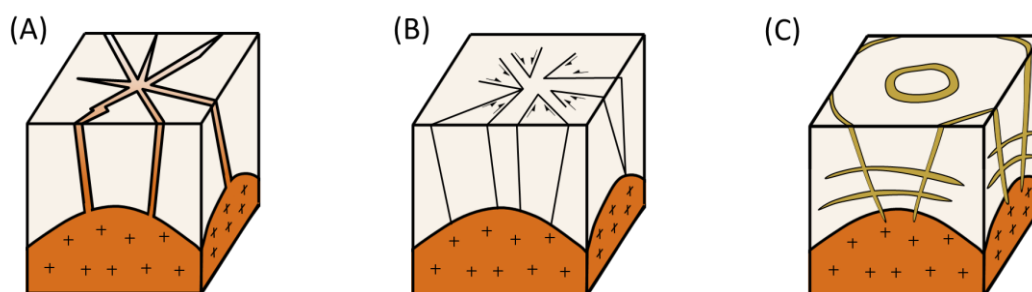


Figura 2.8 – Esquema da formação do diaclasamento sub-horizontal derivado da intrusão do granitoide pós-tectónico. Adaptado de Ribeiro & Pereira (1982).

Assumindo o esquema da Figura 2.8, verifica-se que durante a intrusão do granito tardi pós-varisco, a pressão dos fluídos foi elevada o suficiente para provocar a abertura de um sistema de fracturação radial em torno da cúpula (A), que foi preenchido por um magma residual. Posteriormente e durante a circulação dos fluídos, em (B), ocorreu a greisenização do interior da cúpula granítica, a pressão dos fluidos é reduzida pelo aumento da resistência da rocha à intrusão do magma e desenvolve-se cisalhamento. Por último, inicia-se o arrefecimento e solidificação, originando contração da zona apical (Ribeiro & Pereira, 1982). As estruturas presentes em (C) levam à formação dos filões inclinados (“filões galo”) e reabertura da fracturação sub-horizontal onde se instalaram os filões mineralizados.

### 2.2.5 MORFOLOGIA DO CAMPO FILONIANO

O jazigo apresenta um vasto sistema de filões com diferentes inclinações e morfologias, sendo os sub-horizontais os mais importantes do ponto de vista económico.

Williams (1985) descreve o sistema filoniano, referindo que a maioria dos filões tem inclinação inferior a 25°, e aumenta com a proximidade à cúpula granítica, onde atinge ângulos entre 30° a 40°. A possança dos filões é muito variável, entre 1 cm e 1 m, apresentando valores médios na ordem dos 25 cm. Os filões são extensos, com uma média de 48 m, podendo atingir os 200 m. Lourenço (2002) divide os filões em famílias segundo a sua orientação e inclinação:

- NW-SE, com pendores médios de 10° para SW;
- SW-NE com dois pendores opostos, um 6-10° para NW e 20 a 30° para SE;
- SW-NE com pendores dos 30 a 50° SE (filões galo, menos frequentes).

Os filões apresentam algumas estruturas relevantes, que podem ser indicadores de continuidade do filão (fator importante à exploração) e/ou indutoras de erro aquando da prospeção.

Frequentemente os filões terminam numa estrutura denominada, na gíria mineira, por “rabo de enguia”, que é um estrangulamento em cunha resultante da variação de pressão durante a génese do filão (Figura 2.9 - esquerda). No entanto nem sempre se verifica esta descontinuidade entre os filões, podendo observar-se também uma estrutura apelidada de “ligal” ou “ponte” que, como o nome sugere, é a ocorrência de uma conexão entre dois filões (Figura 2.9 - direita).





Figura 2.9 - Filões sub-horizontais em “rabo de enguia” (esquerda) e filões do tipo “ligal” (direita). Adaptado de Pinto (2014).

Os filões estéreis, ou o já referido “seixo bravo”, são filões concordantes com a xistosidade principal (subvertical), atingem possanças elevadas (até 3 m), e são lenticulares e irregulares (Figura 2.10). Apresentam frequentemente deformação, nomeadamente, dobras com eixos horizontais e plano axial vertical. A sua constituição em quartzo de exsudação metamórfica, estéril, requer cuidado na interpretação quando intersectado no testemunho de sondagens, sendo que pode ser confundido com quartzo hidrotermal e assim, preceder o início de uma exploração incorrecta.



Figura 2.10 - Filões de “Seixo Bravo”. Retirado de Pinto (2014).

Com menos impacto na dinâmica da prospeção e exploração, encontram-se cavidades com minerais bem cristalizados, que são denominadas, na gíria, por “rotos” (Figura 2.11). Alguns dos mais belos cristais de quartzo, cassiterite, wolframite, arsenopirite, apatite, siderite e fluorite do mundo são encontrados nestas estruturas.



Figura 2.11 - Exemplo de um "roto", cavidade onde se podem encontrar minerais bem cristalizados.

### 2.2.6 MINERALIZAÇÃO E PARAGÉNESE

A constituição mineralógica dos filões do jazigo é vasta e complexa. O principal mineral encontrado num filão é o quartzo, cerca de 90%, sendo o restante minério.

Em termos económicos são considerados os minerais volframite, cassiterite e calcopirite. A volframite consiste numa solução sólida de ferberite ( $\text{FeWO}_4$ , com 76,3% de  $\text{WO}_3$ ) e hubnerite ( $\text{MnWO}_4$ , com 76,6% de  $\text{WO}_3$ ). O estanho provém essencialmente dos minerais cassiterite e estanite (Pinto, 2014) e o cobre está relacionado, na sua maioria, com calcopirites.

Para além do minério, isto é, dos minerais economicamente rentáveis, existem muitos outros, que, devido à heterogenia das etapas de formação e à vasta distribuição da sua ocorrência no couro mineiro, tornam difícil criar uma relação paragenética (Pinto, 2014).

Quanto à paragéne das diferentes mineralizações presentes nos filões, Kelly e Rye (1979) apresentam uma divisão em quatro etapas.

A Figura 2.12 explica-se nas etapas seguintes com base em Kelly e Rye (1979) e Pinto (2014):

1. **Etapas de formação de óxidos e silicatos – *Oxide-silicate stage (OSS)***: fase em que se desenvolvem os minerais mais importantes em termos económicos, nomeadamente, mineralizações de tungsténio e estanho (volframite e cassiterite). Deposita-se a maioria do quartzo e moscovite, assim como, turmalina, topázio e a quase totalidade da arsenopirite presente nos filões atuais.

2. **Etapas de formação dos principais sulfuretos – *Main sulfide stage (MSS)***: depositam-se predominantemente sulfuretos, entre eles a pirite, calcopirite, esfalerite, estanite, pirrotite e alguma galena. Voltam a encontrar-se mineralizações de moscovite, arsenopirite e quartzo, terminando esta fase com a deposição da apatite.

Pinto (2014) admite ainda a presença de uma cassiterite II, posterior ao primeiro evento OSS e MSS, mas contemporânea do segundo evento OSS.

3. **Etapla da alteração da pirrotite** – *Pyrrhotite alteration stage (PAS)*: esta fase caracteriza-se principalmente pela libertação de ferro durante a alteração da pirrotite, formando siderite e marcassite. Origina-se uma nova fase de deposição de pirite, e em paralelo depositam-se magnetite e hematite. Derivados da alteração da estanite com reacção da siderite formam-se covelite, calcopirite e cassiterite.

4. **Etapla de formação de carbonatos tardios** – *Late carbonate stage (LCS)*: a última etapa de deposição mineral coincide com a formação de carbonatos (calcite e dolomite), podendo encontrar-se ainda fluorites e clorite.

	Formação de Óxidos e Silicatos	Sulfuretos	Alteração Pirrotite	Carbonatos Tardios
Quartzo Moscovite Turmalina				
Topázio Arsenopirite Cassiterite Volframite				
Pirite Pirrotite Esfalerite Calcopirite				
Estanite Galena Apatite Marcassite				
Magnetite Hematite Siderite Fluorite				
Clorite Dolomite Calcite				

Figura 2.12 - Paragéneses dos minerais do depósito e respetiva sequência de deposição. Adaptado de Kelly e Rye (1979).

## 2.3 DADOS DE PROSPECÇÃO E EXPLORAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se de forma sucinta as metodologias de prospeção e exploração aplicadas na mina, com enfoque especial na forma de recolha dos dados que foi determinante no estabelecimento da metodologia que é proposta neste trabalho.

Os muitos anos de desenvolvimento desta mina levaram a um aperfeiçoamento e dedicação dos métodos ao enriquecimento e otimização dos processos. Cada fator estudado e melhorado contribui para o aumento do conhecimento do jazigo, e também da viabilidade económica da exploração.

### 2.3.1 SONDAGENS

O desenvolvimento dos trabalhos subterrâneos é condicionado pela informação obtida de sondagens. São feitos dois tipos de sondagens: de prospeção e de exploração. Em regra, as sondagens são verticais.

**Sondagens de prospeção** - as sondagens de prospeção são normalmente furos mais longos ( $> 60$  m) e realizados a partir das galerias base da mina, e em alguns casos da zona de exploração. Seguem uma malha regular de  $100 \times 100$  m ou de  $50 \times 100$  m. O objectivo é avaliar a continuidade geológica do depósito mineral e apoiar a estimação do potencial mineiro. A identificação deste potencial apoia o planeamento mineiro.

**Sondagens de exploração** - as sondagens de exploração realizam-se na frente de desmonte, e têm como objetivo a pesquisa de filões próximos, quando o filão a ser explorado desaparece.

#### Leitura e tratamento da informação das sondagens

A amostragem por sondagem é feita à rotação com coroa diamantada (Figura 2.13). As carotes são retiradas, sem orientação, e colocadas em caixas de armazenamento com informação do comprimento das várias manobras efectuadas, nome, direcção e inclinação do furo e informação adicional necessária. O *log* da sondagem é feito *a posteriori*.

A Figura 2.14 apresenta o testemunho de várias manobras de furação na respetiva caixa. Na execução do *log* o responsável regista o comprimento das várias manobras, a possança e mineralogia dos filões intersectados e a litologia, com descrição da cor e alterações associadas (Figura 2.15).



Figura 2.13 - Máquina de sondagem de prospeção (esquerda) e coroa diamantada (direita).



Para cada filão é feita a descrição da sua composição mineralógica, sendo que para fins de estimação do potencial mineral é importante definir se o filão é mineralizado ou é estéril (“seixo bravo”). O “seixo bravo” é apenas referenciado, não como filão, mas como litologia, e não se realiza a descrição mineralógica. É ainda registrada, para cada filão, a quantidade modal de cada mineral (Quartzo, Wolframite, Cassiterite, etc. - Figura 2.15) através de uma variável categórica de 0 a 6, onde 0 significa ausência e 6 significa presença abundante.



Figura 2.14 - Caixa de sondagem. Fotografia do autor.



Figura 2.15 - Dimensão da caixa de sondagem e manobra (esquerda), medição de rocha encaixante e filão (direita cima) e categorização mineralógica do filão (direita baixo).

A possança de filão é utilizada para estimar o potencial mineral, através de uma fórmula empírica desenvolvida e aperfeiçoada internamente. Esta fórmula determina o teor em  $WO_3\%$ , recorrendo a vários fatores e parâmetros (Franco, Vieira, & Bunting, 2014):

$$\text{Teor em } WO_3\% = \frac{(A) \times (B) \times 0,6}{(C) \times (D) \times (E)}$$

Com: (A) Possança de filão em cm; (B) 75% é a proporção média de  $WO_3$  na Wolframite; (C) 2.2 é a altura média do desmonte em metros; (D) 2.8 é a densidade relativa da rocha; (E) 10 é um fator de conversão de unidades (1000/100); O valor 0,6 é um valor empírico derivado da construção da fórmula.

Dependendo da possança do filão  $[18\text{ cm}; 30\text{ cm}[$  ou  $\geq 30\text{ cm}$  o teor obtido pela fórmula é extrapolado para um polígono de  $\sim 30\text{ cm}$  ou  $\sim 50\text{ cm}$ , respectivamente, obtendo-se assim a área de potencial mineiro.

### 2.3.2 DESMONTES

A exploração subterrânea na mina tem evoluído ao longo do tempo. A necessidade de maior eficiência e rentabilidade na extração das mineralizações levou à adoção do método de desmonte por câmaras e pilares que é utilizado atualmente.

O método de câmaras e pilares foi estudado e adaptado de forma a adequar-se às necessidades mecânicas da exploração e, principalmente, à morfologia do jazigo. Trata-se de um método pouco complexo, que consiste em explorar a mineralização em vãos sustentados por pilares dimensionados para suportar as tensões do teto e dos hasteais. Depois da exploração, não é realizado o enchimento das zonas desmontadas, tornando o método mais económico.

A Figura 2.16 representa um corte esquemático, com orientação SW-NE, da exploração da mina e a Figura 2.17 o enquadramento e desenvolvimento de um desmonte entre as *drives* D21 e D23 e os painéis P11 e P13. Os códigos R13 e R11 correspondem às chaminés de exploração dos perfis P11 e P13.

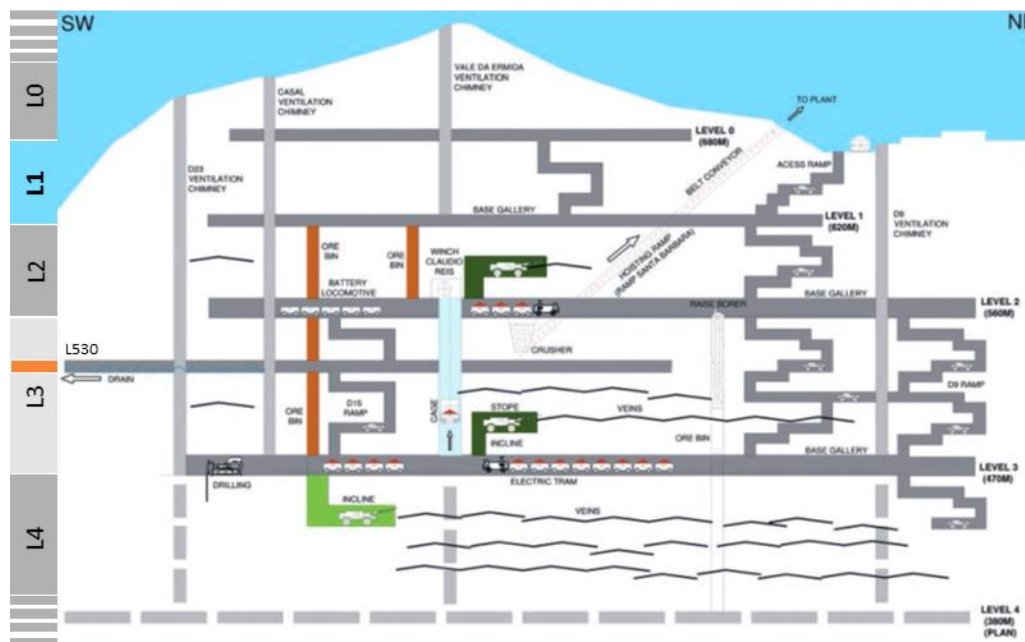


Figura 2.16 – Perfil esquemático da mina. Adaptado de Franco, Vieira & Bunting (2014) e Pinto (2014).

A exploração é condicionada pelos “inclinados” ou galerias piloto, que mediante a intersecção de um filão, economicamente viável e previamente reconhecido por sondagem, pode levar ao avanço para a fase de desmonte. Os “inclinados” são muitas vezes realizados a partir das galerias principais, “*Drives*” (WNW-ESE) ou “*Painéis*” (NNE-SSW), e das rampas.

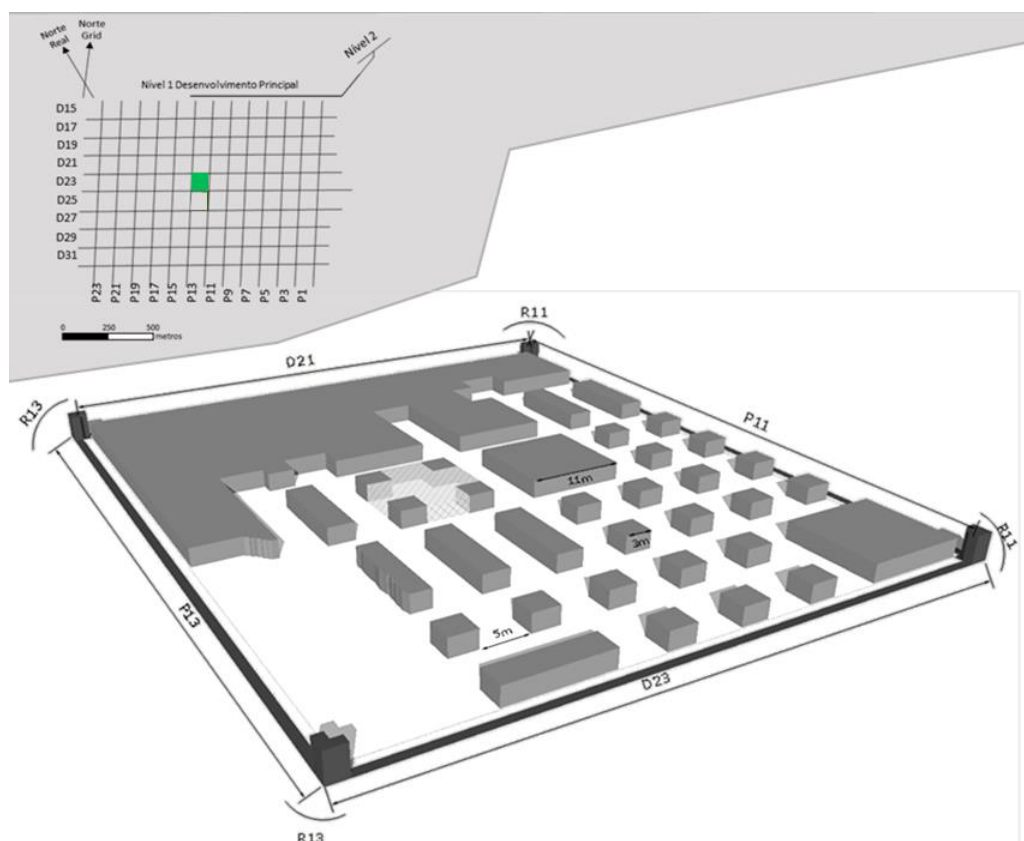


Figura 2.17 – Vista 3D do desmonte entre as *drives* 21 e 23 e os painéis 11 e 13. Adaptado de Franco, Vieira & Bunting (2014) e Pinto (2014).

O desenvolvimento do desmonte dá-se em três fases principais (Figura 2.18):

- 1) São abertas galerias com dimensões de 5 metros de largura e 2,2 metros de altura de forma a criar pilares de 11 x 11 m. A definição de pilares segue a malha topográfica da mina (16x16) – NNE-SSW e WNW-ESE. Teoricamente é explorável 51% nesta fase.
- 2) De seguida, desmontam-se os pilares de 11 x 11 m em pilares de 3 x 11 m, recuperando-se 36% dos pilares maiores.
- 3) Por fim, desmontam-se os pilares da fase anterior, em pilares de 3 x 3 m e explora-se aproximadamente 45% dos pilares 3 x 11 m. No final explorou-se cerca de 85% do recurso inicial.

Os pilares 3 x 3 m não são explorados, permitindo que a mina ceda de forma gradual e em tempo útil até ao abandono da área desmontada. Um dos objetivos deste método é conseguir a menor altura dos desmontes possível, que é proporcional a menos estéril, menos custos de exploração e menos custos na lavaria.

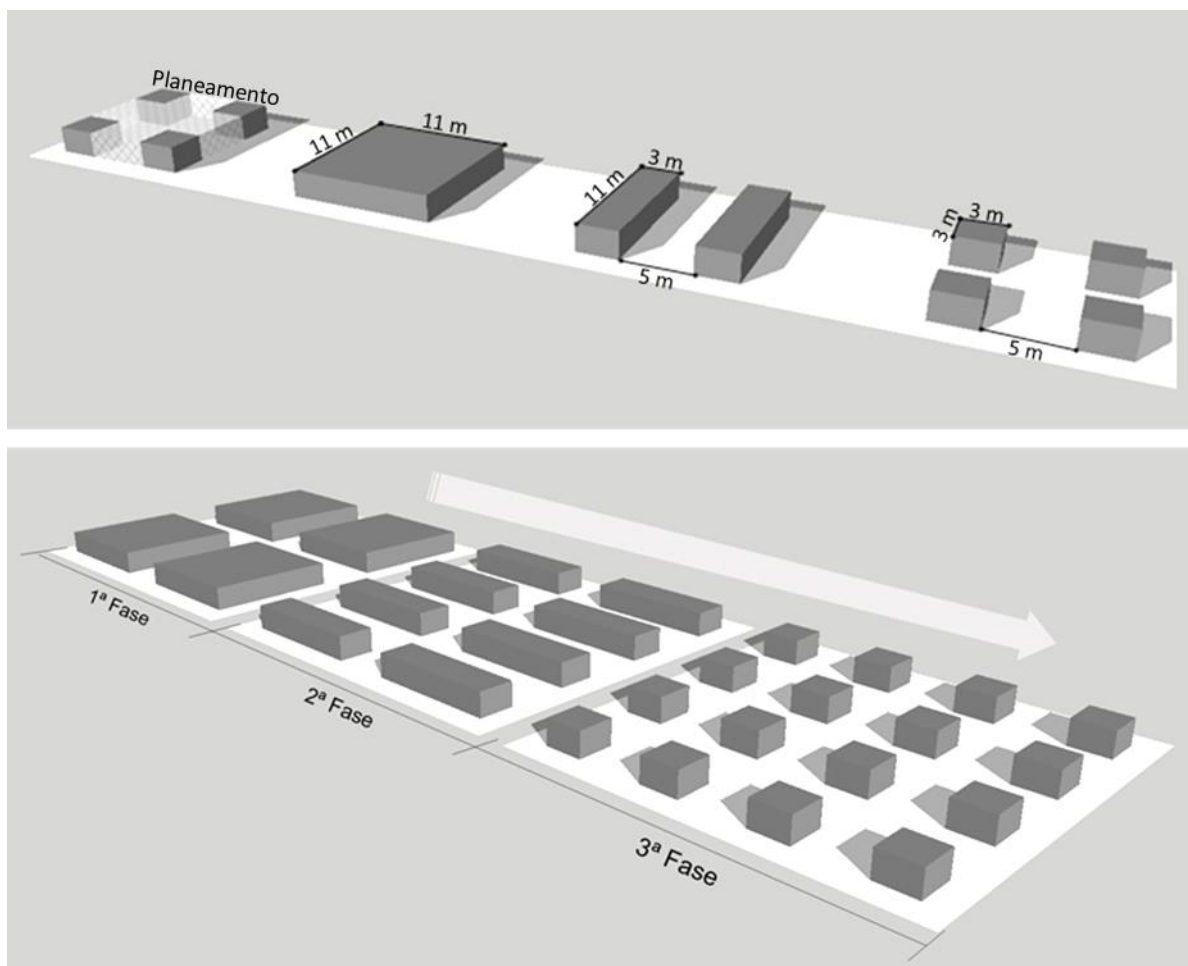


Figura 2.18 - Esquema 3D do método de desmonte em Câmaras e Pilares.

A exploração subterrânea é feita por nível (Figura 2.19 – L0, L1, L2, L3) entre as cotas 740 – 680 (L0), 680 – 620 (L1), 620 – 560 (L2) e 560 – 470 (L3). Dentro de cada nível existem ainda unidades “a ponte” (AW) que, em teoria, dividem a exploração em intervalos verticais de 10 m. Exemplo (Figura 2.17): O L1, com 60 m, teria do AW11 até ao AW16 (numeradas de 1 a 6, precedidas de “1” do nível L1); esta nomenclatura é alvo de exceções.

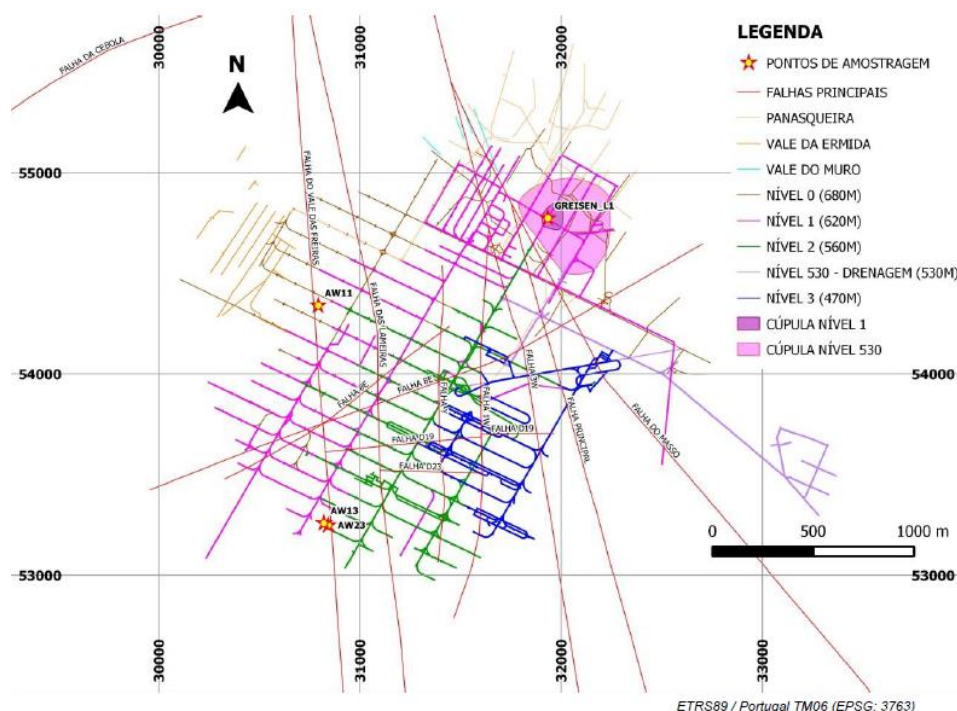


Figura 2.19 – Projecção em planta das principais galerias da mina por cores conforme o nível da exploração (L0, L1, L2 ou L3) (Pinto, 2014).

### Leitura e tratamento da informação dos desmontes

A leitura da quantidade de volframite e da possança dos filões é feita ao longo do desmonte, ao longo de linhas de amostragem horizontais espaçadas de 2 em 2 metros, de forma expedita com uma fita métrica.

Para cada filão são medidas a possança média e a dimensão dos cristais (“pintas”) de volframite segundo as duas dimensões principais de forma a calcular a área total do mineral. Esta metodologia funciona associada a uma fórmula desenvolvida internamente que permite calcular a quantidade de volframite:

*Fórmula* (Franco, Vieira, & Bunting, 2014):

$$(A) \text{ Quantidade de volframite em kg/m}^2 = \frac{(a)}{100 \times (b) \times (c)}$$

(a) Superfície medida de volframite exposta no filão; (b) Comprimento do filão amostrado em metros lineares; (c) Fator empírico 1,5 (fator de reconciliação entre a quantidade de volframite estimada e o quantidade de volframite medida; 100 é um fator de conversão de unidades.

$$\text{Teor em WO}_3\% = \frac{(A) \times (B)}{(C) \times (D) \times 10}$$

(A) Quantidade de volframite em kg/m<sup>2</sup>; (B) 75% é a proporção média de WO<sub>3</sub> na Volframite; (C) 2,2 é a altura média do desmonte em metros; (D) 2,8 é a densidade relativa da rocha; 10 é um fator de conversão de unidades.

O potencial mineral é definido através do cálculo da média do teor em WO<sub>3</sub>% da área exposta de filão.

### **3. MÉTODOS**

#### **3.1 ESTADO DA ARTE**

A caracterização de um depósito mineral depende da quantidade e qualidade das medições das variáveis que descrevem o recurso, nomeadamente, as que se referem à morfologia e aos teores. Trata-se de um processo contínuo no tempo e cumulativo no conhecimento, cuja evolução depende sempre do sucesso das etapas anteriores (Rossi & Deutsch, 2014).

A primeira etapa de caracterização consiste em fazer cartografia geológica e estudos geofísicos de reconhecimento a partir da superfície e, caso ocorram manifestações anómalas, decide-se prosseguir para sondagens, com recolha de testemunhos. Nas sondagens, verticais ou inclinadas, faz-se a descrição das litologias interessadas, e caso haja interesse por alguma litologia em particular, fazem-se análises físicas e químicas das rochas (resistência mecânica, densidade, teores de elementos químicos, dimensão de libertação, etc.). A partir das primeiras sondagens, se houver boas indicações de tipos de minérios e teores, fazem-se mais sondagens e a partir de um certo número de informação pode-se fazer a primeira tentativa de modelação do recurso (modelo geológico que compreende a morfologia e as propriedades) e a avaliação de quantidades (Rossi & Deutsch, 2014). Se estas etapas forem bem sucedidas, inicia-se o projecto da mina com a instalação de infraestruturas e o acesso ao minério. A abertura de galerias de acesso ao minério dá origem a muito mais informação, porque permitem que se faça cartografia geológica de pormenor e também recolher mais amostras para análises laboratoriais. Aqui há que ressaltar que a recolha de amostras no fundo da mina deve obedecer a protocolos de amostragem não tendenciosos, devendo haver sempre algum cuidado na junção de dados obtidos em amostras de fundo da mina e de sondagens. Este assunto será retomado aquando da apresentação da metodologia, porque no caso de estudo da mina que serviu de mote a este trabalho, com um extenso e histórico registo de informação de sondagens e desmontes, a conjugação dos dados pela simples união dos suportes revelou-se inviável.

Os modelos geológicos (morfologia mais teores) constituem a ferramenta essencial que é produzida, em geral, pelo Departamento de Geologia da mina e da qual todas as atividades dependem (Planeamento Mineiro, Relatórios Financeiros, Processamento na Lavaria). Para a sua construção recorrem-se a programas informáticos com as necessárias ferramentas matemáticas, estatísticas, gráficas e bases de dados. Entre estas ferramentas incluem-se as da geoestatística que permitem prever propriedades em localizações não amostradas recorrendo à teoria das variáveis regionalizadas (Goovaerts, 1997; Soares, 2006). Um modelo geológico é um estado da arte do conhecimento do depósito mineral, porque junta de forma lógica e coerente a informação disponível.

Um modelo geológico é todavia uma previsão, e como tal tem simplificações e erros associados. As simplificações estão relacionadas com a enumeração das litologias e elementos químicos, que é sempre mais reduzida do que a real, e também porque os resultados dos modelos são associados a

suportes físicos, o chamado bloco seleção, e estes têm sempre a dimensão de alguns metros. Quando se inicia a exploração mineira, o tratamento dos primeiros minérios na lavaria permite conhecer-se a realidade que foi modelada há algum tempo atrás com a informação dispersa de sondagens. A diferença entre a realidade e o modelo é o chamado erro de previsão ou de estimação. O conceito de erro pode ser trabalhado do ponto de vista do erro médio e da variância do erro (Isaaks & Srivastava, 1989). O erro é um conceito que serve para perceber se uma estimação é enviesada, ou seja, se existe alguma tendência de sub ou sobre estimação; uma estimação enviesada é tendenciosa e pode levar a que um projeto seja classificado como viável não o sendo ou vice-versa. Uma estimação enviesada tem normalmente custos associados motivados por decisões erradas. Já a variância do erro tem a ver com a exatidão das previsões, e aqui o resultado depende muito da quantidade de informação disponível e da fase onde se encontra o projeto mineiro.

A quantificação dos erros pode ser feita na prática por comparação dos teores do modelo e os teores à saída da mina (ou à entrada da lavaria). É habitualmente feita a intervalos de tempo constantes ao longo do projeto de exploração e designa-se por reconciliação (Yamamoto, 1991). O conhecimento destas diferenças ao longo do depósito mineral permite aferir se existe alguma forma de enviesamento no modelo que deva ser corrigida.

Os modelos morfológicos dependem muito da tipologia de depósito que se pretende caracterizar, mas para um depósito mineral como o em estudo, onde a mineralização ocorrem em filões, podem-se utilizar modelos baseados na digitalização da forma dos filões (representação vetorial) ou então modelos quantitativos do número de filões, possança acumulada ou proporções relativas de filão na matriz (representação por malha de blocos ou matricial). Ao contrário dos modelos vetoriais que recorrem a objetos e/ou superfícies para materializar a forma dos filões, os segundos expressam a morfologia, quantitativamente, através de atributos numéricos, como se fosse um modelo de propriedades. Para a sua construção recorrem-se a ferramentas da geoestatística como a variografia e a estimação por krigagem e/ou a simulação estocástica (Goovaerts, 1997; Soares, 2006).

A abordagem clássica para a construção de um modelo geológico do tipo sólido 3D, quando se dispõe de várias sondagens alinhadas em perfis, é identificar o teto e muro dos filões intersectados nas sondagens e digitalizar estes limites com um programa de desenho em computador (Almeida et al., 1993). O desenho envolve a interpretação pericial das ligações entre as sondagens em cada perfil e depois a interpolação entre perfis. No caso de um depósito como o da mina, e dado o elevado número de filões, a digitalização é um trabalho praticamente impossível e, como resposta a esta problemática, Simões (2014) apresentou uma abordagem automática para fazer as ligações entre sondagens a que se segue a transformação do modelo vetorial para matricial sob a forma de índices de proporção de filões. Quando a exploração mineira está num estado muito avançado, passam a ser conhecidos, juntamente com os dados das sondagens, muitos dados de desmontes. Assim, pode-se construir diretamente um modelo morfológico de possanças acumuladas ou de proporção de filão na matriz, porque a



informação sistemática dos desmontes na direção horizontal faz aumentar o conhecimento geológico sobre a continuidade lateral dos filões e a qualidade dos variogramas horizontais das variáveis morfológicas aumenta significativamente.

Os modelos das propriedades têm como objetivo a representação de uma determinada propriedade quantitativa da ocorrência mineral (densidade, teores de elementos químicos, etc.) condicional ao modelo morfológico. A construção de um modelo de propriedades implica uma seleção, e por vezes adaptação, do método geoestatístico que melhor se adapta às necessidades da mineralização em estudo.

Quer para os modelos morfológicos quer para os modelos de propriedades podem ser utilizadas ferramentas geoestatísticas com duas abordagens que se complementam, a krigagem e a simulação estocástica. Na krigagem obtém-se uma imagem média da propriedade estudada, na simulação obtém-se várias imagens com a mesma probabilidade de ocorrência. Ambas são condicionadas à informação disponível, quer seja do tipo principal (*hard data*) ou secundária (*soft data*). A informação secundária de apoio a uma variável quantitativa pode ser do tipo categórico ou contínuo, e pode ser conhecida em todos os locais a estimar ou só nalguns, todavia o princípio é que a informação secundária seja mais abundante do que a informação principal ou pelo menos que seja conhecida em locais complementares e também que tenha correlação com a variável principal.

A simulação geoestatística é a ferramenta adequada para quantificar a incerteza local de uma propriedade (Goovaerts, 1997; Soares, 2006), que depende da proximidade às amostras mais próximas e do grau de heterogeneidade dessas amostras. A simulação gera vários resultados em cada localização a estimar, ou seja, a lei de distribuição da variável, inclusive os valores extremos e variabilidade. Os algoritmos deste tipo mais utilizados atualmente são a Simulação Sequencial Gaussiana (SSG), a Simulação e Cosimulação Sequencial Direta (SSD e CoSSD) (Soares, 2001, 2006) para variáveis de tipo contínuo e a Simulação Sequencial da Indicatriz (SSI) para variáveis categóricas (Goovaerts, 1997; Soares, 2006). Quando a variável secundária é conhecida sob a forma de uma lei de distribuição em cada local a simular, pode ser utilizada a Simulação por Campos de Probabilidade ou *P-field simulation* (PFS) (Goovaerts, 1997, Soares, 2006). Numa simulação têm-se como objetivo que os resultados reproduzam os dados de partida, um determinado variograma e uma lei estatística global ou regional da propriedade em estudo, por isso a verificação passa por comparar os valores simulados e os medidos nos pontos amostrados, que devem ser iguais, assim como comparar os histogramas e os variogramas das imagens simuladas com os objetivos.

A inclusão de informação secundária no estimador de krigagem depende da forma como a informação secundária está disponível e do grau de correlação com a informação principal, mas pode melhorar muito os resultados. Se a informação secundária for conhecida nalguns locais, iguais e diferentes da informação da variável principal, o estimador por eleição é a Cokrigagem (CK) com um modelo de

coregionalização. Se a informação secundária for conhecida por via de uma variável categórica (bi ou multimodalidade), onde cada modalidade tem uma média conhecida, a estimação pode ser feita com a chamada Krigagem Simples com Médias Locais (KSML). Se a informação conhecida for uma variável secundária quantitativa conhecida em todos os locais a amostrar, aqui pode ser utilizada uma estimação por Cokrigagem Colocalizada (CKCL, caso particular da CK) ou então se a variável secundária tem um comportamento com a mesma tendência da variável principal pode ser utilizada a Krigagem com Deriva Externa (KDE). Estas variantes de krigagem podem ainda ser combinadas entre si em casos particulares, o objetivo é sempre ter o “melhor” estimador para a informação disponível.

Estas variantes de krigagem podem ser aplicadas em contexto de simulação, e aqui realça-se a flexibilidade da SSD para a utilização destes estimadores na estimação da média e variâncias locais. Entre os exemplos recentes de aplicação da SSD a massas e depósitos minerais destacam-se os seguintes trabalhos:

- (1) Depósito tabular: Caracterização e avaliação dos recursos do depósito mineral de Farim-Saliquinhé, com uma metodologia que conjuga a construção de um modelo morfológico e de propriedades numa estrutura em camadas amostrada por suportes de dimensão variável (Charifo, 2008; Charifo, 2012, Charifo et al., 2013). Utilizou-se a SSD e CoSSD com histogramas locais.
- (2) Depósito maciço e fissural: Modelação do depósito do Zambujal, Mina de Neves Corvo, condicionando os teores de cobre e zinco a um modelo morfológico de tipos de minério (Rodrigues, 2013). Em primeiro lugar é construído um modelo geométrico 3D do corpo mineralizado, por digitalização da envolvente e interpolação de superfícies, a que se segue a SSD com histogramas locais dos teores. Silva et al (2015), num trabalho de modelação do mesmo depósito, faz a modelação da proporção de sulfuretos na matriz (modelo morfológico) a que se segue a modelação dos teores em cobre, zinco e prata condicionados ao modelo morfológico. Foi utilizada a SSD com histogramas locais.
- (3) Massa mineral: Modelação de teores e índices de qualidade em calcários para o fabrico de cimento na Secil. As variáveis de qualidade são várias e algumas estão correlacionadas, assim a simulação deve ser feita seguindo um modelo de coregionalização. Neste exemplo propôs-se considerar as componentes principais de uma análise ACP como variáveis secundárias de uma CoSSD onde a estimação é feita por cokrigagem colocalizada ao invés de um modelo de coregionalização global e cokrigagem simples (Almeida, 2010).

Quando a informação disponível sobre a variável secundária é uma variável categórica não completamente amostrada em todos os locais pode ser utilizada a metodologia proposta por Almeida e Roxo (2014) e Matias et al (2015) onde se faz a estimação da variável categórica por Krigagem da Indicatriz (KI) a que se segue a estimação dos histogramas locais da propriedade e a simulação PFS.

## 3.2 DESCRIÇÃO DE SUPORTE DAS FERRAMENTAS GEOESTATÍSTICAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO

A geoestatística abrange um conjunto de técnicas e ferramentas fundamentais à interpretação e previsão do comportamento de fenómenos no espaço e no tempo (Goovaerts, 1997; Soares, 2006), em contraponto com a estatística clássica que não faz a análise da interdependência espacial da informação. Matheron (1971) desenvolve os primeiros trabalhos na caracterização de depósitos minerais, utilizando conceitos da geoestatística, que define como: “*applications of the theory of regionalized variables*”. Posteriormente, as ferramentas foram desenvolvidas e adaptadas de forma a ser possível a sua aplicação em contextos diferentes como: reservatórios de petróleo e gás natural, sistemas aquíferos e, mais recentemente, problemas de poluição aplicados a solos, águas e qualidade do ar.

Soares (2006) apresenta a geoestatística como um conjunto de ferramentas que pretende caracterizar a distribuição espacial de grandezas e avaliar a incerteza das medições que sustentam os resultados, assumindo sempre a magnitude da variabilidade como dependente da qualidade da amostragem, da variabilidade intrínseca e do grau de conhecimento do fenómeno em estudo.

O principal paradigma da geoestatística é a transformação de valores desconhecidos em localizações não amostradas em realizações de uma Variável Aleatória (VA). As variáveis aleatórias podem assumir um conjunto de respostas com base numa lei de distribuição e são caracterizadas, não apenas pela componente aleatória, mas também pela componente estrutural da sua variabilidade no espaço, que quando existente nos coloca perante uma Variável Regionalizada (VR) (Goovaerts, 1997; Soares, 2006). No estudo das VR é importante medir a continuidade espacial e as variações desta medida nas diferentes direções.

A abordagem metodológica para a utilização da geoestatística num estudo inicia-se com a análise exploratória de dados (análise uni e bivariada) a que se segue a análise estrutural (cálculo e modelação de variogramas) a previsão propriamente dita (estimação por krigagem ou simulação) e a utilização dos resultados (avaliação de recursos, planeamento mineiro, etc.).

### 3.2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

Os instrumentos geoestatísticos de medida da continuidade espacial possibilitam caracterizar e quantificar o comportamento da variável, permitindo, assim, medir o grau de continuidade e de dispersão no espaço (Goovaerts, 1997; Soares, 2006). A análise estrutural está na base dos algoritmos de previsão geoestatística, quer os de estimação quer os de simulação.

As principais ferramentas de medida de continuidade espacial em geoestatística são o variograma e a covariância espacial, sendo estas duas medidas equivalentes. É todavia habitual trabalhar-se com o variograma.

O variograma é uma ferramenta da geoestatística que permite calcular a dependência espacial entre os dados em estudo, ou seja, é uma medida de correlação que permite quantificar a continuidade espacial. Uma estimativa do variograma consiste no cálculo do semi valor médio do quadrado das diferenças entre observações (pares de pontos), segundo uma direcção e distância, vetor  $\vec{h}$  (Figura 3.3). Para calcular o variograma cruzam-se todos os pares de pontos possíveis. Para uma população de amostras  $y(x_i)$ , o variograma experimental é calculado pela seguinte fórmula:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [y(x_i) - y(x_i + h)]^2$$

em que  $N(h)$  representa o número de pares de observações,  $h$  a distância de cálculo do variograma e  $y(x_i)$  o valor da variável na localização  $x_i$ .

Os valores do variograma experimental  $\gamma(h)$  são calculados para uma ou mais direcções, que são definidas por um azimuth, inclinação e tolerância angular. Os resultados são habitualmente representados num gráfico em função da distância  $h$  (Figura 3.4).

Os valores de  $\gamma(h)$ , para distâncias  $h$  mais elevadas, tendem a estabilizar em torno de um valor, patamar (C), que representa a dispersão intrínseca da população de dados (variância). A distância onde o variograma atinge o patamar denomina-se por amplitude (a) e corresponde à distância máxima de correlação, a partir da qual as amostras são espacialmente independentes.

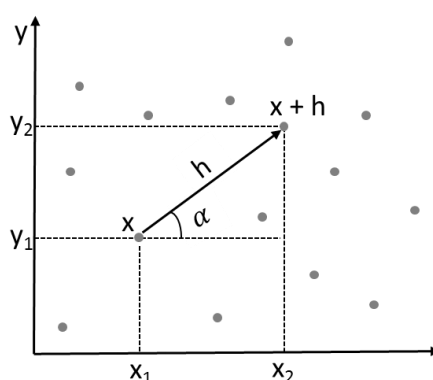


Figura 3.1 – Representação em planta no plano XoY de um hipotético conjunto de amostras onde se mostra o ângulo azimuthal  $\alpha$  e a distância  $h$  do vetor que liga um qualquer par de pontos.

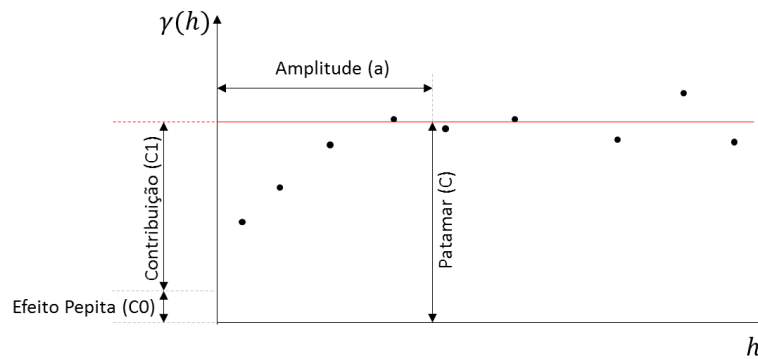


Figura 3.2 - Representação gráfica dos pontos de um variograma experimental para uma dada direção e significado do efeito de pepita, patamar e amplitude.

O efeito de pepita ( $C_0$ ) corresponde à ordenada na origem do variograma e pode revelar erros na amostragem e a variabilidade associada ao menor suporte amostrado.

Os resultados do variograma experimental são interpretados através do ajuste de uma função teórica, parametrizada em função da amplitude, patamar e efeito de pepita, que melhor se ajuste ao comportamento dos pontos. Nas Ciências da Terra, o comportamento espacial de fenómenos naturais é, geralmente, bem representado pelas seguintes funções (Soares, 2006):

*Esférica:*

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[ 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], & h < a \\ C, & h \geq a \end{cases}$$

*Exponencial:*

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - e^{-3h/a}]$$

### 3.2.2 PREVISÃO

Os resultados obtidos com as ferramentas de medida de continuidade espacial (variogramas) servem de base à aplicação dos algoritmos de estimação por Krigagem e/ ou Simulação estocástica, que permitem prever o comportamento das variáveis em estudo, nos pontos não amostrados.

No presente trabalho são utilizados os algoritmos Krigagem Ordinária (KO), Krigagem Simples (KS), Simulação Sequencial Gaussiana (SSG), Simulação Sequencial Direta (SSD) e Simulação por Campos de Probabilidade (PFS – *Probability Field Simulation*) pelo que se faz uma breve explanação destes algoritmos.

### 3.2.2.1 Krigagem Normal

A Krigagem Normal ou Krigagem Ordinária (KO) é um estimador que assume a estacionariedade da média em relação à da população inicial de dados. Os valores estimados por KO resultam da combinação linear de um número ( $N$ ) de amostras vizinhas do ponto a ser estimado (Goovaerts, 1997; Soares, 2006). O valor estimado ( $Z_{KO}^*$ ) na localização ( $x_0$ ) é obtido pela ponderação das amostras selecionadas:

$$Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i^{KO} \cdot y(x_i)$$

Os ponderadores da KO ( $\lambda_\beta^K$ ) são calculados resolvendo o sistema de equações de krigagem que é construído com dois critérios, o não enviesamento dos resultados e a minimização da variância de estimação:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\beta=1}^N \lambda_\beta^K(u) C(u_\beta, u_\alpha) = C(u, u_\alpha), \quad \alpha = 1, \dots, N \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i^{KO} = 1 \end{array} \right.$$

Em que  $C$  corresponde à covariância entre duas localizações separadas da distância  $h$  e com  $C(h) = \sigma^2 - \gamma(h)$

As principais propriedades da Krigagem são (Soares, 2006):

- Exatidão – nos locais amostrados, o valor da estimativa da Variável Regionalizada (VR) coincide com o valor experimental;
- Unicidade – a krigagem oferece uma solução única;
- Variância da krigagem – unicamente dependente da posição e da estrutura espacial da VR, pelo que constitui uma medida de incerteza incompleta.

### 3.2.2.2 Krigagem Simples

A Krigagem Simples (KS) é um estimador para situações de média não estacionária e conhecida, nestes casos faz-se a estimação dos chamados resíduos. A ponderação para a estimação dos valores por KS na localização ( $x_0$ ) é a seguinte:

$$Z_{KS}^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i^{KS} \cdot [Z(i) - m(i)] + m(x_0)$$

Onde  $Z(i)$  representa o valor da Variável Aleatória (VA) nas posições amostradas ( $i$ ), enquanto  $m(x_0)$  corresponde à média da VA na localização ( $x_0$ ). Os ponderadores,  $\lambda_i^{KS}$ , são obtidos por um sistema de equações semelhante ao da KO mas onde a soma dos ponderadores não obriga a ser um.

As condições da KS podem implicar assumir a estacionariedade da média e, assim, o estimador passa a respeitar a equação:

$$Z_{KS}^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i^{KS} \cdot Z(i) + \left[ 1 - \sum_{i=1}^N \lambda_i^{KS} \right] m$$

### 3.2.2.3 Simulação Sequencial Gaussiana e Simulação Sequencial Direta

Com a simulação geoestatística pretende-se gerar imagens equiprováveis do comportamento de determinado fenómeno, e não a imagem média que é obtida por uma estimação. Todavia, a média de um conjunto de imagens simuladas é equivalente à que seria obtida numa estimação por Krigagem. Estes métodos permitem reproduzir algumas características dos dados em estudo, nomeadamente, a variabilidade, lei de distribuição, comportamento dos valores extremos, a incerteza local e continuidade espacial do conjunto de observações (Soares, 2006).

A validação de uma simulação observa o cumprimento de três condições (Soares, 2006): (1) O histograma dos resultados deve ser igual ao dos dados iniciais desagregados; (2) o variograma das imagens simuladas deve apresentar o mesmo comportamento espacial das observações de partida; (3) em cada posição amostrada o valor simulado deve coincidir com o valor da amostra.

Entre os algoritmos de simulação destacam-se os de Simulação Sequencial (SS). A SS é um conjunto de algoritmos de simulação que têm como base de aplicação a relação de Bayes (Goovaerts, 1997; Soares, 2006), apresentando um ramo comum no algoritmo, que se explica nos pontos seguintes.

A SS inicia-se tendo como ponto de partida uma lei de distribuição conjunta de  $N$  variáveis aleatórias (VA) e  $n$  valores condicionantes,  $F(N) = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N | n)$ , resultando a simulação das VA da aplicação da relação de Bayes, em  $N$  etapas consecutivas.

1. Define-se um caminho aleatório sobre a área A e simula-se o valor  $z_1$  com base na lei de distribuição  $Z_1$ . De seguida, adiciona-se  $z_1$  ao conjunto de informação condicionante, tal que,  $n + 1: n + z_1$ ;
2. Simula-se um novo valor,  $z_2$ , com base na lei de distribuição  $Z_2$ , condicionada ao novo conjunto de valores. Adiciona-se  $z_2$  ao conjunto de informação condicionante, tal que,  $n + 2: (n + 1) + z_2$ ;
3. O processo é repetido até todas as  $N$  variáveis serem simuladas.

O processo pode ser aplicado a uma só variável, correndo o algoritmo para os  $N$  nós da variável, no lugar das  $N$  variáveis., sendo necessário o conhecimento das  $N$  leis de distribuição cumulativas condicionais.

A SSG é uma das variantes da SS, que implica a transformação prévia dos valores da variável para uma lei gaussiana.

Neste estudo, aplicou-se a SSD proposta por Soares (2001, 2006) com uma modificação proposta por Roxo (2010) para assumir histogramas regionais ao invés de um único histograma global. Soares (2001) explica o algoritmo da DSS, para uma malha com  $N$  blocos e uma variável aleatória  $Z_1(x)$ , nos seguintes pontos onde em 2.1 utiliza-se a KSML em vez da KS e em 2.2 utiliza-se um histograma regional em vez do histograma global:

1. Gerar uma sequência aleatória que contemple todos os blocos da malha;
2. Iniciar a sequencia aleatória e simular para cada bloco,  $Z_1^S(x)$ :
  - 2.1. Estimar por KSML a média  $(z_1(x)^*)$  e variância  $(\sigma_{z_1}^2(x)^*)$  locais de  $Z_1(x)$  no bloco, como as médias e variâncias dos histogramas condicionais de cada região, correspondente;
  - 2.2. Recorrer ao histograma condicional da região do bloco, como histograma local;
  - 2.3. Gerar um número aleatório  $p$  de uma lei de distribuição Uniforme definida de  $U[0; 1]$ ;
  - 2.4. Gerar o valor simulado  $\gamma^S$  a partir de uma lei de distribuição gaussiana, tal que,
 
$$G(z_1(x)^*; \sigma_{z_1}^2(x)^*); \gamma^S = G^{-1}(z_1(x)^*; \sigma_{z_1}^2(x)^*; p);$$
  - 2.5. Realizar a transformada inversa de forma a obter o valor simulado pretendido:  $Z_1^S(x)$ .
3. Aplicar o ponto 2. A todos os  $N$  blocos da malha.

#### 3.2.2.4 Simulação por Campos de Probabilidade (PFS - Probability Field Simulation)

O algoritmo de Simulação por Campos de Probabilidade (PFS) mostra-se uma opção válida e bem adaptada a alguns problemas que não são corretamente resolvidos pelo algoritmos de simulação sequencial, e nos quais onde se conhece localmente a lei de distribuição *a priori* da variável a simular obtida por via de um qualquer cálculo adicional ou indireto (Srivastava & Froidevaux, 2004).

Segundo Cassiraga e Gómez-Hernández (2001), o algoritmo de PFS segue os seguintes passos:

1. Definir malha de blocos ou células para a área de estudo;
2. Obter por uma qualquer via a lei de distribuição cumulativa condicional local da variável em estudo (neste caso são as leis de distribuição compósitas);
3. Gerar probabilidades não-condicionais,  $p(u)$ , com lei de distribuição uniforme e uma função de covariância  $C_p(h)$  com uma amplitude previamente estabelecida, recorrendo a um



algoritmo de simulação; Caso se recorra à simulação gaussiana é necessária uma transformação para lei uniforme dos resultados;

4. Para cada nó / bloco, determinar o valor de simulado,  $z(u)$ , através da inversão da lei de distribuição local com probabilidade  $p(u)$ :  $z(u) = F^{-1}(u, p(u)|(n))$
5. Repetir os pontos 4. e 5. para os restantes nós.

### 3.3 METODOLOGIA

Como já referido, a mina explora um depósito filoniano, onde os filões com volframite são sub-horizontais. A metodologia proposta para a construção de um modelo geológico (morfologia e quantidade de volframite) do depósito mineral foi desenhada de forma a utilizar toda a informação da Base de Dados (estratégia do tipo *data driven approach*), quer a proveniente de sondagens quer a proveniente dos desmontes, e ainda em termos da presença / ausência de filão, presença / ausência de volframite e quantidade de volframite. Assim, neste capítulo referem-se alguns testes preliminares que condicionaram o desenho da metodologia e que são detalhados no capítulo do caso de estudo.

Ao todo foram consideradas 3496 sondagens datadas de 1971 a 2014 que totalizam 150331,62 m de amostragem tendo sido identificadas 24271 intersecções com filões. As sondagens têm informação do código, coordenadas X, Y, Z da origem, os metros furados e a orientação (azimute e inclinação) média. As intersecções das sondagens com os filões são registadas pela profundidade inicial e final dos filões (os valores são registados em centímetros, a diferença é uma possança aparente do filão) ao qual é adicionada uma variável qualitativa da presença de volframite, graduada em 7 modalidades de 0 a 6. Relativamente a desmontes foram utilizados dados provenientes de 71052 linhas de amostragem. As linhas estão georreferenciadas com as coordenadas X, Y, Z do piso e a altura média de todas as linhas é 2,2 m. Nas linhas de desmonte são reportadas a possança total de filões e a quantidade de volframite em  $\text{kg/m}^2$ .

Em síntese, a informação morfológica proveniente das sondagens reporta a localização dos filões em termos das coordenadas de início e fim das intersecções e a proveniente das linhas de amostragem dos desmontes reporta a possança total da linha nos 2,2m de altura. A informação da quantidade de volframite é apresentada nas sondagens por uma variável categórica com 7 modalidades de quantidade e nos desmontes é apresentada por uma variável contínua expressa em kg de volframite por  $\text{m}^2$  de área. No caso da informação morfológica, os quantitativos das sondagens e desmontes são comparáveis e podem ser trabalhados em conjunto se os dados da possança forem acumulados para troços de 2,2m. Todavia, para a quantidade de volframite a informação é distinta entre sondagens e desmontes e assim para este suporte é necessário apresentar uma metodologia adaptada a este caso particular de apresentação da informação.

A primeira tentativa experimental de modelação da morfologia foi contabilizar a possança dos filões nas sondagens para troços / suportes de várias dimensões, calcular variogramas da possança acumulada, quer para as sondagens quer para os desmontes, e comparar os resultados. Se existissem semelhanças nos variogramas poder-se-ia juntar os conjuntos de dados, caso contrário seria necessário arquitetar uma metodologia adequada onde estes dados entrassem à vez. Os variogramas dos desmontes mostraram ser de excelente qualidade, onde exibem amplitudes muito significativas de 600 m e 40 m nas direções horizontal e vertical, respetivamente. Para as sondagens foram experimentados vários suportes, e apenas se começou a encontrar continuidade espacial na direção horizontal quando os dados das sondagens são regularizados para blocos com 50x50x30m (para blocos com duas ou mais sondagens consideram-se os valores médios). Estes resultados mostram duas coisas:

- (1) Os dados das sondagens apenas podem ser misturados com os dos desmontes se for adotada uma resolução de malha de blocos com 50x30x30 m;
- (2) Os variogramas dos dados dos desmontes são muito bons, e a informação detalhada dos desmontes perder-se-ia nesta junção.

A dimensão da malha de blocos que mais se adapta ao planeamento mineiro de curto-prazo é de 10m de lado, e uma modelação feita com blocos de 50x50x30m teria pouco interesse. Acresce ainda uma questão de representatividade, os valores de possança acumulada medidos nos desmontes são muito mais elevados do que os calculados nas sondagens com o mesmo suporte, devido à exploração e execução das galerias de acesso serem condicionadas pela presença de filão, o que nas sondagens não se verifica dado a furação ser feita em contínuo. Isto quer dizer, que se for calculada uma estimativa por krigagem com os dados das sondagens, a média obtida será não enviesada.

A metodologia dita ideal para o modelo morfológico é apresentar os resultados como a proporção de filão no bloco (variável *PF*) numa malha de blocos de 10x10x10m, condicionando os resultados à média desagrupada dos valores estimados por krigagem só com os dados das sondagens mas que, simultaneamente, utilize a informação dos desmontes onde ela exista.

Para o modelo de quantidade de volframite, é utilizada a quantidade medida nos desmontes, como principal (ou *hard data*), e deve-se incluir a informação das sondagens como secundária porque é mais abrangente, embora seja expressa por uma variável de quantidade de volframite qualitativa que resulta da apreciação do técnico/observador sendo, assim, suscetível a erros mais elevados. Também as sondagens têm diâmetros reduzidos, e amostram mal a presença / ausência errática da volframite nos filões à pequena escala.

As evidências e os condicionalismos apresentados permitiram estabelecer a estratégia para duas metodologias independentes e dedicadas à construção dos modelos morfológico e de quantidade de volframite do depósito mineral.

### 3.3.1 MODELO MORFOLÓGICO DA PROPORÇÃO DE FILÃO

A metodologia destinada a construir o modelo morfológico do depósito mineral da mina encontra-se ilustrada no fluxograma da Figura 3.1. Compreende quatro etapas principais que se descrevem seguidamente.

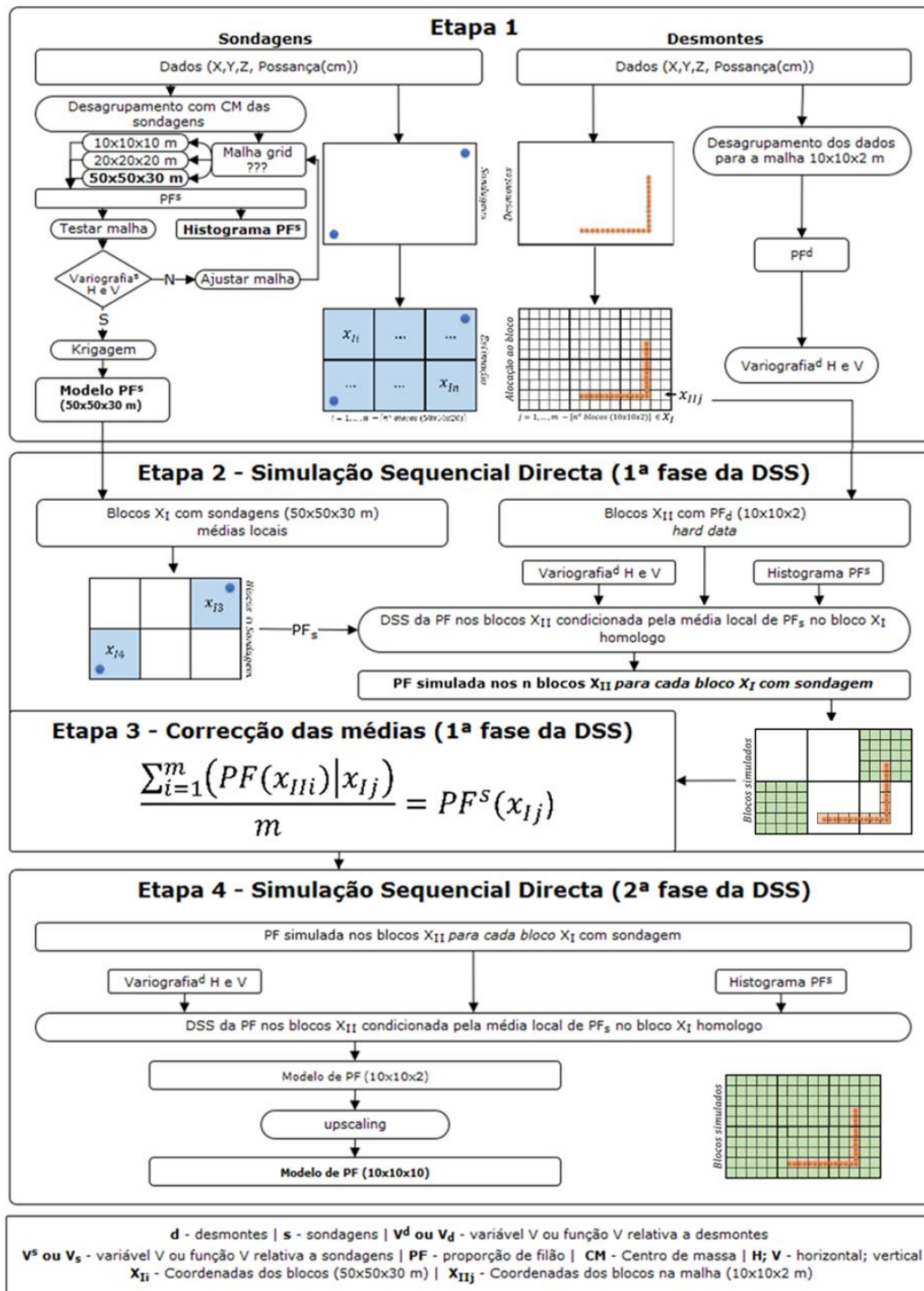


Figura 3.3 - Fluxograma com a metodologia destinada à construção do modelo morfológico do depósito mineral da mina.

### 3.3.1.1 Etapa 1: definição da malha de blocos e desagrupamento dos dados

Na primeira etapa é utilizada a informação geográfica (coordenadas X, Y, Z) e a possança dos filões (cm) proveniente dos dois suportes de amostragem, desmontes e sondagens. Nos desmontes a possança dos filões está acumulada para a altura da linha de amostragem, 2,2m; nas sondagens está disponível a possança de cada filão intersectado. Nestas condições, os suportes dos desmontes não podem ser alterados nem agrupados para outra dimensão, já a informação das sondagens pode ser discretizada na dimensão de suporte que se pretender. Assim, a informação das sondagens e dos desmontes foi trabalhada em separado nesta etapa 1.

Em primeiro lugar foi necessário estabelecer a dimensão da malha de blocos com que será trabalhada a informação das sondagens e a informação dos desmontes, sabendo que no final o modelo geoestatístico da morfologia e também da quantidade de volframite deverá ser apresentado na malha de 10x10x10m.

Atendendo à dimensão da malha final pretendida e a altura dos desmontes, para a construção do modelo geoestatístico optou-se por uma malha de blocos com as dimensões de 10x10x2m para todo o depósito, que no final será agrupada para os blocos 10x10x10m. Os 10 metros na direção horizontal justificam-se porque é a dimensão final pretendida para o modelo geoestatístico. Na vertical consideraram-se blocos com 2m de altura porque são compatíveis com a altura dos desmontes (2,2m).

A informação da possança acumulada dos desmontes foi posicionada na malha de blocos com as dimensões de 10x10x2m tendo sido construída e trabalhada a variável proporção de filão (volume de filão no bloco,  $PF^d$ ); sempre que existiam vários desmontes no mesmo bloco foi calculada a média das medições. Com os valores de  $PF^d$  reposicionados no centro dos blocos, calcularam-se os respetivos variogramas nas direções dos eixos coordenados e foram ajustados os modelos teóricos. Os variogramas da variável  $PF^d$  foram de excelente qualidade, pelo que do ponto de vista dos desmontes a malha de 10x10x2m pode ser utilizada sem problema.

Para o processamento variável proporção de filão com os dados das sondagens, foi necessário definir uma segunda malha de blocos, tendo-se testado várias dimensões: 10x10x10m, 20x20x20m, e 50x50x30m. As intersecções dos filões pelas sondagens permitiram calcular a possança acumulada de filão para cada bloco e também a proporção de filão no bloco  $PF^s(x_i)$ . Estes valores foram georeferenciados para as coordenadas do centro de gravidade dos troços de sondagem que estão contidos em cada bloco. Determinaram-se variogramas desta variável  $PF^s(x_i)$  nas direcções horizontal e vertical tendo-se concluído que apenas foi possível obter variogramas de boa qualidade para a malha de dimensão 50x50x30m. Este facto foi determinante no estabelecimento da metodologia e faz com que não seja possível juntar, simplesmente, as observações das sondagens e dos desmontes.

Existem várias razões para que não tenha sido possível encontrar variogramas das sondagens sem as agrupar para grandes blocos ou regiões com 50x50x30m, entre as quais existirem registos incorretos

de posicionamento de algumas sondagens levando à degradação das correlações na direção horizontal. Assumindo que a georreferenciação das sondagens está correta, a explicação mais plausível para que não se tenham encontrado variogramas é que a ocorrência dos filões medida pela variável  $PF$  apresente duas estruturas espaciais (ou de variograma), uma primeira estrutura com amplitude reduzida e patamar elevado, que está relacionada com a dimensão média dos filões (extensão planar), e uma segunda estrutura de muito maior amplitude e de patamar mais reduzido, que reflete a intensidade regional de ocorrência dos filões. Se a dimensão média dos filões for da ordem da dezena de metros, como as sondagens mais próximas entre si têm distâncias superiores, a primeira estrutura não é amostrada no cálculo dos variogramas experimentais e o resultado dos gráficos é um quase efeito de pepita. Quando se agrupam as sondagens mais próximas, como se faz com o apoio da malha de 50x50x30m, na prática, passa-se a mapear nos variogramas só a estrutura relacionada com a intensidade regional de ocorrência dos filões e não com as suas dimensões individuais, pelo que os variogramas mostram uma amplitude bem identificada e perdem o efeito de pepita. Dado que, para se calcular variogramas, a informação das sondagens foi agrupada para uma malha de 50x50x30m, esta deve influenciar o modelo como informação regional nessa escala, sendo introduzida como médias locais. Esta questão do posicionamento não voltou a ser abordada neste estudo mas deverá ser retomada em estudos posteriores.

O histograma regional da  $PF^S$  desagrupada, para ser utilizado na DSS, foi estimado por Krigagem da Indicatriz.

### 3.3.1.2 Etapa 2: 1ª Fase da Simulação Sequencial Direta

Na segunda etapa da metodologia faz-se a SSD da variável  $PF$  apenas para os blocos  $x_{Ili}$  da malha de 10x10x2m que estão contidos nos blocos  $x_{Ij}$  da malha de 50x50x30m, intersectados por troços de sondagem. O objetivo é simular os blocos  $x_{Ili}$  da malha de 10x10x2m que contenham sondagens na sua vizinhança, e que os respetivos valores sejam considerados como informação secundária na SSD. A estimação da média e variância locais do algoritmo SSD utiliza a Krigagem Simples com Médias Locais, condicional ao histograma global e desgregado de  $PF^S$  e aos variogramas de  $PF^d$  (horizontal e vertical). Em síntese, a simulação é condicional à informação e estrutura dos desmontes (informação tida como principal), e às sondagens (informação tida como secundária devido a potenciais erros de posicionamento).

### 3.3.1.3 Etapa 3: Correção das Médias

Na etapa anterior, a SSD simula a variável  $PF$  nos blocos  $x_{Ili}$  com médias locais mas se os resultados forem agregados para o bloco homólogo  $x_{Ij}$  observam-se desvios em relação ao valor médio estimado.

Para corrigir estas discrepâncias nas médias, nesta etapa faz-se a correção dos valores simulados para que no final se verifique:

$$\frac{\sum_{i=1}^m (PF(x_{Ili})|x_{Ij})}{m} = PF^s(x_{Ij})^{KO}$$

Os blocos que contém desmontes não são alterados, assim a correção das médias só é aplicada aos valores simulados dos blocos  $x_{Ili}$  que não contém desmontes.

Inicialmente:

$$\frac{\sum_{i=1}^m (PF(x_{Ili})|x_{Ij})}{m} \neq PF^s(x_{Ij})$$

Então determina-se o valor médio inicial:

$$PF^s(x_{Ij})^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^m (PF(x_{Ili})|x_{Ij})}{m}$$

Faz-se a correção:

$$PF(x_{Ili}) = PF(x_{Ili}) - PF^s(x_{Ij})^{(1)} + PF^s(x_{Ij}) \text{ se } PF(x_{Ili}) \text{ não contém desmontes.}$$

Recalcula-se a média:

$$PF^s(x_{Ij})^{(2)} = \frac{\sum_{i=1}^m (PF(x_{Ili})|x_{Ij})}{m}$$

É expectável que  $PF^s(x_{Ij})^{(2)}$  se tenha aproximado do objetivo, mas mesmo assim ainda existe discrepância porque os blocos que contém os desmontes não foram corrigidos. Assim, a correção das médias faz-se ao longo de  $k$  iterações até que

$$PF^s(x_{Ij})^{KO} \cong PF^s(x_{Ij})^{(k)}$$

Importa referir que os desmontes oferecem informação de maior pormenor e em maior quantidade, no entanto, as medições são espacialmente enviesadas dado a exploração ser condicionada à presença de filão. Isto resulta numa média da variável  $PF^D$  muito maior do que a  $PF^S$ . A correção proposta permite atenuar este efeito logo na vizinhança dos desmontes e originar um modelo mais próximo da realidade e, principalmente, condicional à informação das sondagens.

#### 3.3.1.4 Etapa 4: 2ª Fase da Simulação Sequencial Direta

A última etapa da metodologia destinada à construção do modelo morfológico consiste em fazer a SSD para os restantes blocos da malha  $x_{Ili}$ , mantendo o condicionamento ao histograma global desagrupado de  $PF^S$  e o variograma dos desmontes. Os blocos simulados nesta etapa são também

condicionais aos resultados obtidos na SSD da etapa 2 já com a correção para a aproximação das médias realizadas na etapa 3. No final, a malha de blocos de 10x10x2m é aumentada para a malha final de 10x10x10m fazendo a média aritmética de conjuntos de 5 blocos na vertical.

### 3.3.2 MODELO DE QUANTIDADE DE VOLFRAMITE

A segunda metodologia destina-se a construir o modelo de quantidade de volframite do depósito mineral da mina e encontra-se ilustrada no fluxograma da Figura 3.4. O objetivo estabelecido, simular quantidades de volframite condicionadas à informação medida nos desmontes e classes de quantidade de volframite reportadas nas sondagens, é concretizado através de cinco etapas que se desenvolvem seguidamente.

As quantidades de volframite nos desmontes são convertidas para  $\text{kg/m}^3$  de filão, ou seja, divide-se os valores reportados na Base de Dados que estão em  $\text{kg/m}^2$  pela possança acumulada dos filões nas linhas de amostragem verticais. Isto significa que o potencial mineral de volframite em peso (kg ou toneladas) será obtido no final multiplicando o volume de cada bloco pelos valores de *PF* do modelo morfológico e pelos valores do modelo de quantidade de volframite.

Todo o modelo de quantidade de volframite é desenvolvido na malha de blocos com 10x10x2m, fazendo-se no final o aumento para a malha da mina de 10x10x10m.

#### 3.3.2.1 Etapa 1: Definição dos histogramas condicionais de cada classe

A primeira etapa consiste na construção de histogramas condicionais das quantidades de volframite medidas nos desmontes (kg de volframite por  $\text{m}^3$  de filão) às sete classes de quantidade de volframite [0; 6] identificadas nas sondagens.

Como a informação dos desmontes não está colocalizada com a das sondagens, foi necessário, para cada filão identificado e categorizado em termos do quantidade de volframite nas sondagens, pesquisar qual o valor de quantidade de volframite do desmonte mais próximo. Esta pesquisa foi limitada a 50 m na direção horizontal (dimensão dos blocos de estimação utilizados para as sondagens) e 15 metros na direção vertical. No caso de serem encontrados vários desmontes dentro dos raios de influência, para efeitos de construção do histograma cumulativo da quantidade de volframite foi calculado o valor médio.

Depois de associada uma quantidade de volframite ou a quantidade de volframite média de várias medições a cada filão reconhecido nas sondagens, são construídos os histogramas condicionais da quantidade de volframite, primeiro por classes de quantidade de volframite e depois escolhendo a melhor associação de classes de quantidade de volframite. Este procedimento permite reduzir o

número de classes e aumentar a discriminação da quantidade de volframite entre as classes reagrupadas.

Desta etapa resultam, no máximo, duas a três classes reagrupadas cujo grau de separação / discriminação estará associado a eficácia de aplicação da metodologia.

### **3.3.2.2 Etapa 2: Krigagem da Indicatriz**

Na segunda etapa é aplicada a Krigagem da Indicatriz às classes de quantidade de volframite das sondagens, eventualmente reagrupadas, para estimar a probabilidade de cada bloco de pertencer a cada classe ou conjunto de classes. A estimação é feita na malha de 50x50x30m mas os resultados são colocados na malha de 10x10x2m repetindo-se os valores homólogos.

### **3.3.2.3 Etapa 3: Construção das leis de distribuição locais condicionais de quantidade de volframite**

A etapa três tem como objetivo determinar as leis de distribuição locais da quantidade de volframite condicionais a cada classe de quantidade de volframite. Para o efeito geraram-se conjuntos de realizações de quantidade de volframite, em número igual ao das classes, por SSD com histogramas regionais diferenciados por nível da mina.

Para cada conjunto são feitas  $n$  realizações onde a informação condicionante são os dados dos desmontes. Para o efeito, para cada desmonte é seleccionada qual a intersecção de filão de sondagem mais próxima e é-lhe associado o código da classe de quantidade de volframite correspondente, redefinida na Etapa 1.

Para estimar os histogramas regionais diferenciados por nível da mina faz-se a estimação por Krigagem da Indicatriz da quantidade de volframite para todo o volume da mina, e posteriormente contabilizam-se os resultados por nível (L0, L1, L2 ou L3). O condicionamento da quantidade de volframite simulada a histogramas regionais aumenta a coerência dos resultados simulados precisamente porque uma grande fração da região a simular está longe das sondagens e existe segregação regional da quantidade de volframite em profundidade.

Depois de simuladas  $n$  imagens por bloco para cada classe de quantidade de volframite, cada conjunto de  $n$  valores em cada bloco constitui a lei de distribuição condicional pretendida.



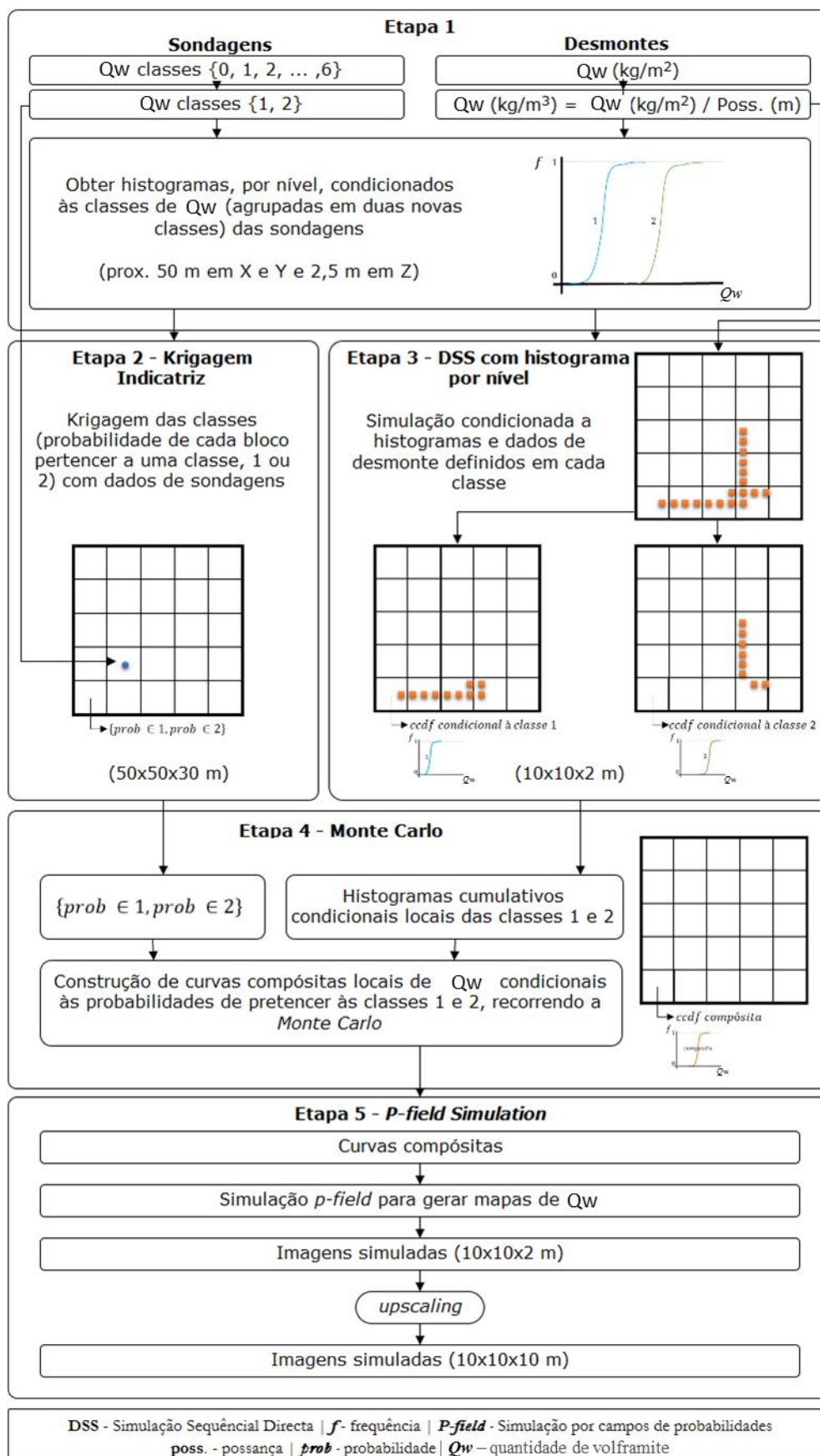


Figura 3.4 - Fluxograma com a metodologia destinada à construção do modelo de quantidade de volfrâmio do depósito mineral da mina.

#### **3.3.2.4 Etapa 4: Construção de leis de distribuição locais compósitas de quantidade de volframite**

Esta quarta etapa combina os resultados das probabilidades estimadas de pertença a cada classe ou agrupamento de classes (Etapa 2) com as leis de distribuição locais e condicionais de quantidade de volframite (Etapa 3). As leis de distribuição locais compósitas de quantidade de volframite são obtidas pela mistura dos histogramas individuais das classes ponderadas pelas probabilidades estimadas. A mistura recorre ao procedimento de Monte Carlo.

Por exemplo, se existirem duas classes de quantidade de volframite {I, II}, cada uma com a sua lei de distribuição, e se as probabilidades estimadas forem 0,8 e 0,2 respetivamente, para construir o histograma compósito com 100 valores 80 são amostrados da lei I e 20 são amostrados da lei II.

Os histogramas de quantidade de volframite obtidos em cada bloco constituem uma estimativa da lei de distribuição da quantidade de volframite, que tem em conta a quantidade de volframite dos desmontes e a informação das classes de quantidade de volframite das sondagens. Na localização exata de um desmonte, a lei compósita têm variância zero e média igual à quantidade de volframite do desmonte; na localização de uma sondagem a probabilidade estimada será 1 para uma classe e zero para as restantes e aí a lei de distribuição compósita coincide com a lei de distribuição da classe com probabilidade igual a 1; nos restantes casos observa-se a mistura dos histogramas resulta em histogramas com maior ou menor variância de acordo com o maior ou menor afastamento aos desmontes.

#### **3.3.2.5 Etapa 5: simulação de imagens de quantidade de volframite**

Conhecidas as leis de distribuição locais da quantidade de volframite em cada bloco, nesta etapa 5 simulam-se imagens de quantidade de volframite recorrendo ao algoritmo de Simulação por Campos de Probabilidade (PFS).

No final, os resultados de cada simulação são sujeitos a um processo de agrupamento na vertical, por média aritmética, para apresentar os resultados na malha de 10x10x10m.

## 4. CASO DE ESTUDO

As duas metodologias expostas no capítulo anterior, respetivamente para a morfologia e quantidade de volframite, foram aplicadas à Base de Dados da mina disponibilizada pela Companhia Mineira cujos resultados se apresentam e discutem nos pontos seguintes. Os dados de quantidade de volframite e os resultados consequentes, por questões de confidencialidade, estão uniformizados para o intervalo [0, 1].

### 4.1 APRESENTAÇÃO DOS DADOS E MALHA DE BLOCOS

A informação disponibilizada engloba dados em dois suportes: desmontes e sondagem. Os dados de desmontes são referentes às medições realizadas em linhas de amostragem verticais nos acessos e incluem: coordenadas (X, Y, Z); possança acumulada dos filões intersectados (cm); quantidade de volframite (kg/m<sup>2</sup>). Os dados das sondagens estão subdivididos em dois ficheiros, o primeiro com dados da sondagem (código da sondagem, coordenadas X, Y, Z da boca da sondagem (m); comprimento da sondagem (m); inclinação (°); azimute (°)) e o segundo com a descrição dos filões intersectados em cada sondagem (código da sondagem, profundidade inicial e final de intersecção do filão (m); possança filão (cm), grau de ocorrência de volframite [0; 6]).

Os dados utilizados contêm 59047 leituras de desmontes e 2759 sondagens (com 20913 filões). A aplicação das metodologias propostas implica a preparação dos dados e a criação de malhas de blocos diferenciadas consoante o suporte da informação.

#### 4.1.1 DESMONTES

As medições realizadas nos desmontes correspondem a frentes com uma altura média de 2,2 m e compreendem a espessura de filão (ou espessura acumulada no caso de existirem 2 ou mais filões) em centímetros e a quantidade de volframite em kg/m<sup>2</sup>.

Para a construção do modelo morfológico da mina não se utiliza a possança de filão mas a variável proporção de filão no volume (*PF*) que é calculada, tendo em conta a altura média das galerias da mina de 2,2 m, segundo a equação seguinte:

$$PF = \frac{Possança\ (cm)}{220\ cm}$$

De forma a criar um modelo de quantidade de volframite independente da quantidade de filões, é necessário dissociar a quantidade de volframite medida na frente da possança do filão, donde se recalcula a variável quantidade de volframite para kg/m<sup>3</sup>:

$$\text{Quantidade de wolframite (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Quantidade de wolframite (kg/m}^2\text{)}}{\text{Possanção (m)}}$$

No cálculo de *PF* assume-se que os filões são sub-horizontais e são amostrados por linhas de amostragem verticais, que intersectam os filões na perpendicular.

Todas as etapas de modelação que utilizem a informação dos desmontes são realizadas na malha 10x10x2 m (Figura 4.1), que foi definida tendo em conta os 10m na horizontal compatível com a estrutura da mina e a altura média dos desmontes (2,2 m). Esta discrepância de 0,2m não se considerou significativa. Na tabela 4.1 sintetizam-se os dados geométricos desta malha de blocos e na figura 4.1 mostra-se a relação de dimensões. Esta malha contempla 4 819 500 blocos.

Tabela 4.1 - Geometria da malha de blocos 10x10x2 m.

Direção	Coordenadas do canto inferior esquerdo (m)	Dimensão (m)	Nº de blocos
OX	0	10	170
OY	0	10	210
OZ	470	2	135

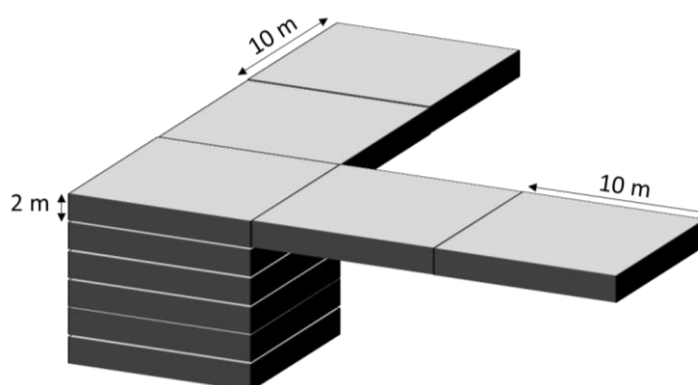


Figura 4.1 - Malha de blocos no suporte dos desmontes (10x10x2 m).

#### 4.1.2 SONDAGENS

Os dados das sondagens foram sempre modelados com uma malha de blocos com as dimensões de 50x50x30m e cuja justificação, baseada na regularização dos suportes e ajuste de modelos dos variogramas da possança, já foi apresentada na metodologia da morfologia em 3.2.1. Tal como no caso da malha de blocos dos desmontes, na tabela 4.2 sintetizam-se os dados geométricos desta malha de blocos e na figura 4.2 mostra-se a relação de dimensões. Esta malha contempla 12 852 blocos.

A amplitude de cotas entre os pisos L0 e L3 é de 270 m, assim a utilização de um bloco com 30 m de altura é múltiplo desta dimensão.

Tabela 4.2 - Geometria da malha de blocos 50x50x30 m.

Direção	Coordenadas do canto inferior esquerdo (m)	Dimensão (m)	Nº de blocos
OX	0	50	34
OY	0	50	42
OZ	470	30	9

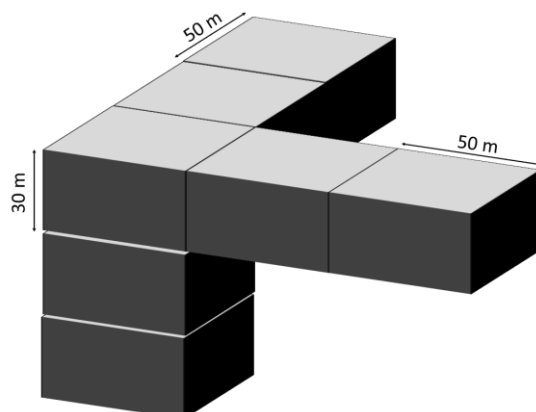


Figura 4.2 - Malha de blocos no suporte das sondagens (50x50x30 m).

À semelhança dos desmontes, nas sondagens a possança dos filões intersectados é convertida para proporção de filão (*PF*) no suporte da malha de blocos 50x50x30 m, ou seja, é calculada a espessura acumulada de filão no bloco que contém as sondagens, o comprimento total de sondagem no bloco, e por fim, a *PF* no bloco pelo quociente:

$$PF = \frac{\sum \text{possança de filão}}{\sum \text{comprimento de sondagem}}$$

O valor de *PF* calculado com o auxílio dos blocos é associado ao centro de gravidade dos troços de sondagem que entraram no cálculo e não ao centro do bloco. A variável categórica [0, 6] não é alvo de cálculos, para a KI os valores transformados em indicatriz {0, 1} são associados a cada registo de filão na coordenada do respetivo centro de gravidade da intersecção com a sondagem.

#### 4.1.3 MALHA DE BLOCOS FINAL

No final da modelação, os resultados dos dois modelos são convertidos para a malha compatível com um planeamento de curto-prazo (10x10x10m). O processo de agrupamento (*upscaling*) permite relacionar os resultados com as unidades estruturais da mina. A geometria da malha de blocos do suporte das sondagens é apresentada na Tabela 4.3. Esta malha contempla 963 900 blocos.

Tabela 4.3 - Geometria da malha de blocos 10x10x10 m.

Direção	Coordenadas do canto inferior esquerdo (m)	Dimensão (m)	Nº de blocos
OX	0	10	170
OY	0	10	210
OZ	470	10	27

## 4.2 ESTATÍSTICA UNIVARIADA

Neste capítulo apresenta-se a estatística univariada das variáveis possança, *PF* e quantidade de volframite dos desmontes e sondagens.

Os dados de quantidade de volframite apresentados e os resultados, por questões de confidencialidade, estão normalizados para o intervalo [0, 1].

### 4.2.1 DESMONTES

A Tabela 4.4 apresenta os resultados da análise estatística univariada aplicada à variável possança, em centímetros, medida no suporte dos desmontes. A figura 4.5 apresenta os histogramas cumulativos destes valores para os 4 níveis.

Tabela 4.4 - Estatísticos básicos da possança dos filões medida nos desmontes, por nível da mina e global.

Parâmetros		L0 <sup>1</sup>	L1	L2	L3	Global
Nº de amostras em desmontes		3425	21635	31581	2333	59047
Possança (cm)	Média	26,7	30,7	32,4	34,3	31,5
	Variância	103,24	222,72	177,12	306,44	197,27
	Desvio Padrão	10,16	14,92	13,31	17,51	14,05
	Coefficiente de variação	0,38	0,49	0,41	0,51	0,45
	Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Q1	19,5	20,0	24,0	21,0	21,5
	Mediana	26,0	30,0	33,0	31,0	31,0
	Q3	32,5	37,0	40,0	45,5	39,0
	Máximo	73,0	126,0	82,0	105,0	126,0
Coefficiente de assimetria		0,64	1,20	0,36	0,80	0,79

<sup>1</sup> O nível L0 tem menos registos informatizados devido a ser a zona explorada mais antiga

A possança média dos filões identificados nos acessos aos desmontes é de 31,5 cm, e quando se analisa a possança por nível, observa-se que os valores médios mais baixos estão no nível L0 e sobem gradualmente em profundidade. Este aumento também é confirmado pela análise da mediana com exceção do nível L3. Os níveis L3 e L1 são os que apresentam maior dispersão, a que se seguem os níveis L2 e L0, este último o mais homogêneo. As possanças variam entre 0 (ausência de filão) e os 126 cm, sendo que as ocorrências mais possantes se encontram no nível L1 e L3. As ocorrências de possança nula são residuais. Todos os níveis revelam assimetrias positivas ou à direita, o que significa que predominam os valores baixos sendo os valores mais elevados os anómalos. Todas estas afirmações podem ser confirmadas com as curvas cumulativas.

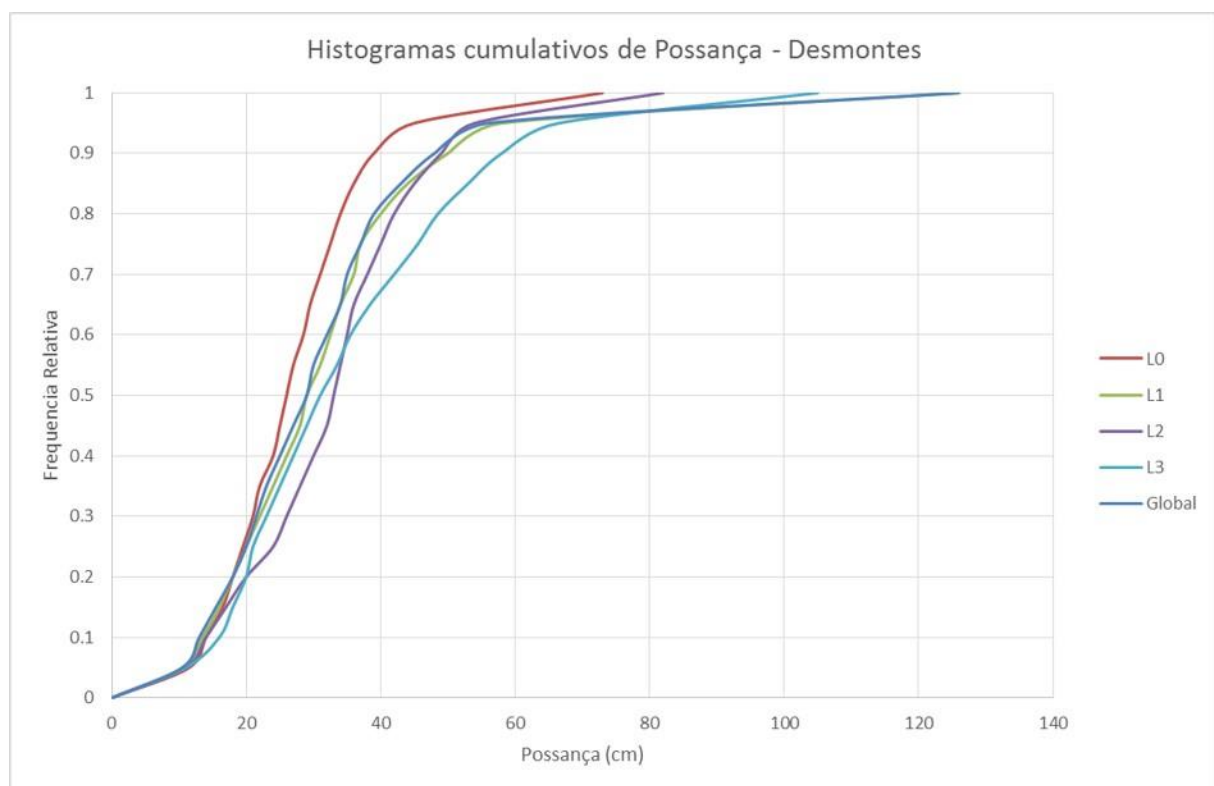
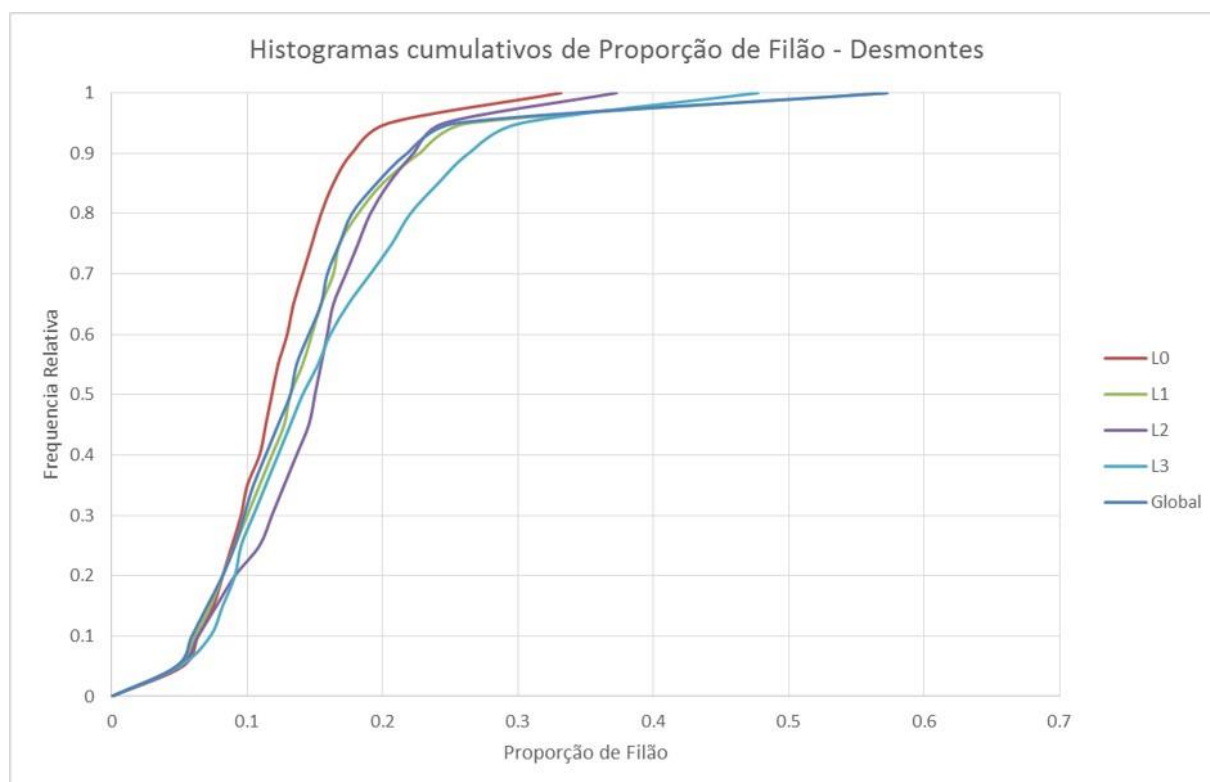


Figura 4.3 - Histogramas cumulativos da possança nos desmontes por nível L0, L1, L2 e L3 e global.

Aplicou-se a mesma análise estatística à transformação da variável possança para  $PF^d$ . Os resultados apresentados na Tabela 4.5 são proporcionais aos anteriores, como esperado. A  $PF^d$  média global da mina é de 0,143 (14,3%) ocorrendo os valores mais elevados no nível L3. Os histogramas cumulativos dos níveis encontram-se representados na Figura 4.4, seguem exatamente o mesmo comportamento da possança mas na escala recalculada para proporção.

Tabela 4.5 – Estatísticos básicos da variável  $PF^d$  calculada nos desmontes.

Parâmetros		L0	L1	L2	L3	Global
Nº de amostras em desmontes		3425	21635	31581	2333	59047
Proporção de Filão	Média	0,121	0,139	0,147	0,156	0,143
	Variância	0,002	0,005	0,004	0,006	0,004
	Desvio Padrão	0,046	0,068	0,060	0,080	0,064
	Coefficiente de variação	0,381	0,486	0,411	0,511	0,445
	Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Q1	0,089	0,091	0,109	0,095	0,098
	Mediana	0,118	0,136	0,150	0,141	0,141
	Q3	0,148	0,168	0,182	0,207	0,177
	Máximo	0,332	0,573	0,373	0,477	0,573
	Coefficiente de assimetria	0,637	1,199	0,359	0,804	0,786

Figura 4.4 - Histogramas cumulativos de  $PF^d$  calculados nos desmontes por nível L0, L1, L2 e L3 e global.

Para a variável quantidade de volframite em  $\text{kg/m}^3$  foram calculados os mesmos parâmetros estatísticos das variáveis anteriores que se apresentam na Tabela 4.6 e Figura 4.5.



Tabela 4.6 – Estatísticos básicos da variável quantidade de volframate amostrada nos desmontes.

Parâmetros		L0	L1	L2	L3	Global
Nº de amostras em desmontes		3425	21635	31581	2406	59047
Quantidade de volframate (kg/m <sup>3</sup> )	Média	0,028	0,038	0,054	0,033	0,046
	Variância	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001
	Desvio Padrão	0,033	0,033	0,037	0,040	0,036
	Coefficiente de variação	1,182	0,854	0,675	1,198	0,789
	Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Q1	0,007	0,013	0,026	0,001	0,016
	Mediana	0,018	0,035	0,057	0,023	0,046
	Q3	0,037	0,057	0,075	0,050	0,069
	Máximo	0,329	0,608	1,000	0,418	1,000
Coeficiente de Assimetria		2,95	2,70	2,45	2,66	2,38

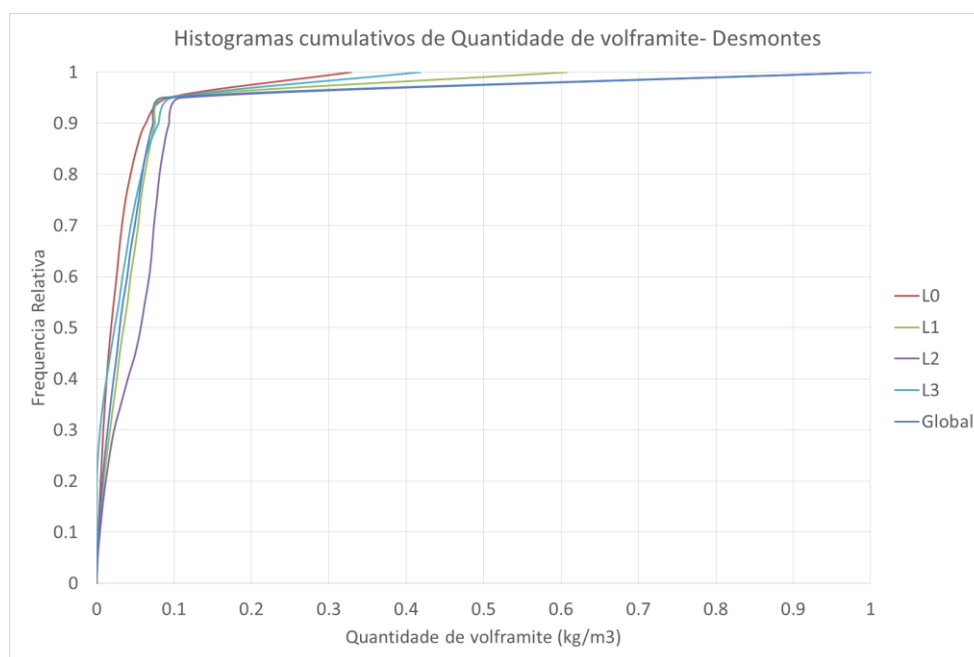


Figura 4.5 - Histogramas cumulativos de quantidade de volframate nos desmontes por nível L0, L1, L2 e L3 e global.

A Tabela 4.6 mostra que a quantidade de volframate média global da mina encontra-se nos 0,046 kg/m<sup>3</sup>, no entanto este valor não é constante quando a análise é aplicada a cada nível, manifestando-se muito mais alto no nível L2, da ordem do dobro dos níveis L0 e L3 e significativamente mais elevado do que L1.

Todos os níveis apresentam dispersão elevada, facilmente visível através do coeficiente de variação, que apresenta desvios em relação à média entre os 70% e os 120%. A quantidade de volframate varia

entre 0 kg/m<sup>3</sup> (ausência de volframite) e os 1 kg/m<sup>3</sup>, sendo que as ocorrências mais ricas e amómalas se encontram no nível L1 e L2.

Os coeficientes de assimetria são todos positivos e relativamente elevados, sinal de que as ocorrências mais comuns são os valores baixos e os valores mais elevados constituem anomalias. O fenómeno é evidente nos histogramas cumulativos apresentados na Figura 4.5, com gráficos das leis de distribuição muito assimétricos e com caudas para a direita.

#### 4.2.2 SONDAGENS

Relativamente à análise estatística dos dados das sondagens, começou-se por analisar a possança dos filões intersectados pelas sondagens. Na tabela 4.7 mostram-se os estatísticos básicos da possança dos filões e na figura 4.6 os respetivos histogramas cumulativos por nível.

Tabela 4.7 – Estatísticos básicos da possança dos filões intersectados pelas sondagens.

Parâmetros		L0	L1	L2	L3	Global
Amostras		2615	7022	7846	3509	20992
Possança (cm)	Média	9,0	10,9	12,7	13,1	11,7
	Variância	80,0	146,3	192,8	193,8	165,2
	Desvio Padrão	8,9	12,1	13,9	13,9	12,9
	Coeficiente de variação	0,997	1,107	1,090	1,065	1,097
	Mínimo	1	1	1	1	1
	Q1	3	4	5	4	4
	Mediana	6	7	8	8	8
	Q3	12	14	16	17	15
	Máximo	78	190	160	174	190
Coeficiente de assimetria		2,26	3,43	2,94	2,46	3,03

A possança (cm) medida nas sondagens revela, em termos médios, a mesma tendência observada na análise dos desmontes, que é o aumento em profundidade. O valor médio de todos os níveis encontra-se nos 11,7 cm (cerca de 1/3 do valor registado nos desmontes). Esta diferença confirma que as medições nos desmontes são enviesadas relativamente às das sondagens precisamente porque os trabalhos de desenvolvimento seguem os filões com possança superior a 18 cm. Por esta razão, as medidas de dispersão e de assimetria são mais elevadas do que as observadas nos desmontes para a mesma variável.

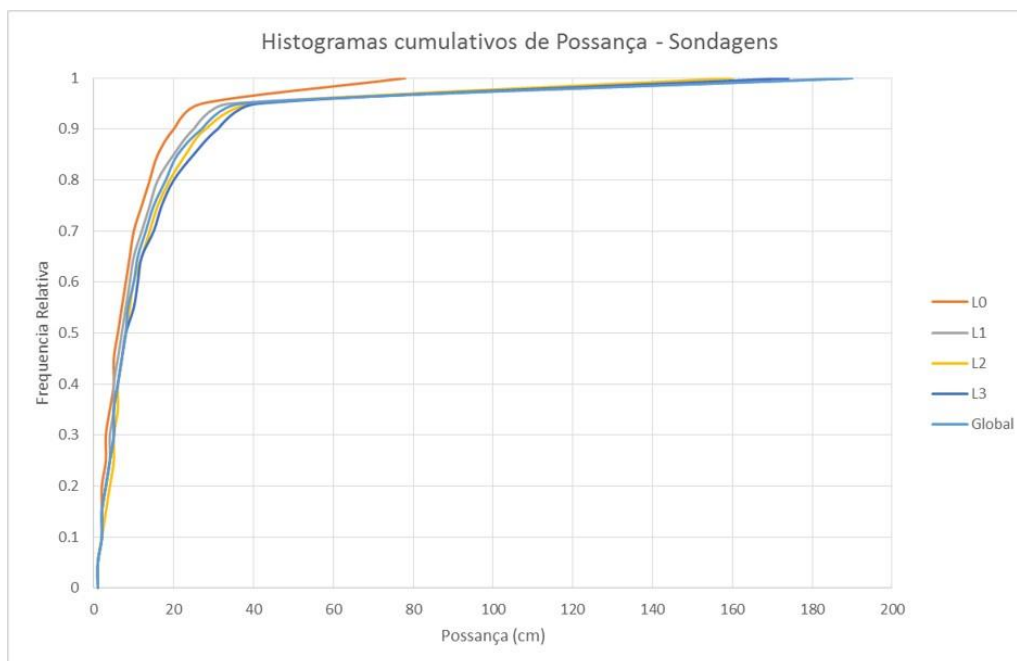


Figura 4.6 - Histogramas cumulativos da possança dos filões intersectados pelas sondagens por nível L0, L1, L2 e L3 e global.

Seguidamente calculou-se uma estimativa global não desagregada da  $PF^S$ , dividindo a possança total de filões pelo comprimento total de sondagens:

$$PF^S = \frac{\sum \text{possança de filão}}{\sum \text{comprimento de sondagem}}$$

Os resultados apresentam-se na tabela 4.8. As sondagens indicam que 2,2% do depósito correspondem a filão.

Tabela 4.8 – Comprimento total das sondagens, possança total dos filões e  $PF^S$  média do depósito no suporte das sondagens.

	Centímetros	Metros
<b>Comprimento total de sondagem</b>	11301253	113012,53
<b>Comprimento total de filão</b>	246031,6	2460,316
<b><math>PF^S</math></b>	0,022 (2,2%)	

Os dados das sondagens foram então convertidos para suportes regulares, apoiados por uma malha de blocos de 50x50x30m. A Tabela 4.9 apresenta os resultados da análise univariada da variável  $PF^S$  já regularizada e na figura 4.7 apresentam-se os respetivos histogramas cumulativos.

Tabela 4.9 – Estatísticos básicos da variável  $PF^S$  já regularizada com apoio da malha de blocos 50x50x30m por nível e global.

Parâmetros		L0	L1	L2	L3	Global
Amostras		340	638	710	521	2209
Proporção de Filão	Média	0,022	0,026	0,021	0,015	0,021
	Variância	0,0002	0,0004	0,0002	0,0002	0,0003
	Desvio Padrão	0,015	0,019	0,014	0,013	0,016
	Coefficiente de variação	0,683	0,746	0,649	0,860	0,757
	Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Q1	0,011	0,012	0,011	0,004	0,009
	Mediana	0,020	0,022	0,020	0,011	0,018
	Q3	0,030	0,036	0,030	0,022	0,030
	Máximo	0,096	0,109	0,081	0,060	0,109
	Coefficiente de assimetria	0,992	1,187	0,736	0,958	1,178

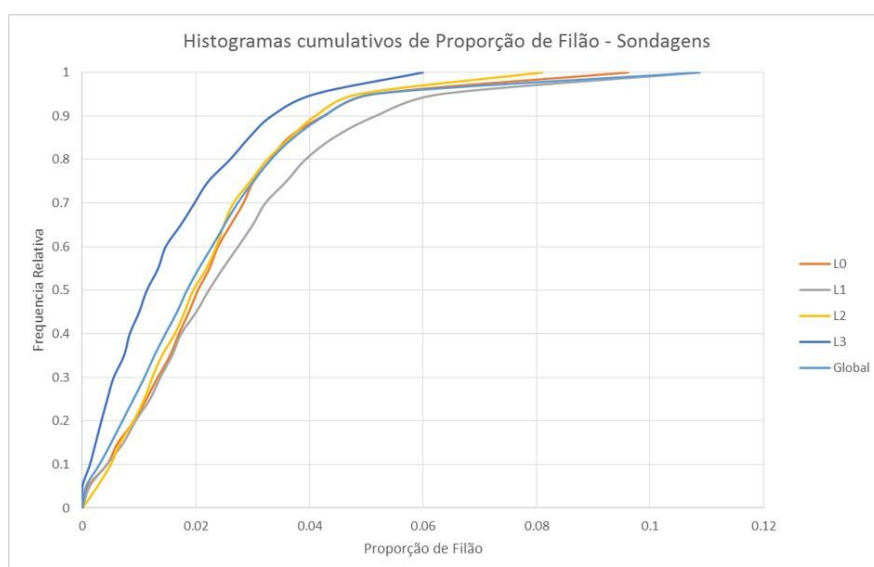


Figura 4.7 - Histogramas cumulativos da variável  $PF^S$  por nível L0, L1, L2 e L3 e global.

O valor médio de  $PF^S$ , desagrupada para a malha 50x50x30 m, no depósito é de 0,021, o que mostra que o enviesamento da amostragem dos desmontes, devido às galerias seguirem preferencialmente os filões mais ricos e possantes, é de cerca de 7x. Dado que as sondagens constituem uma amostragem contínua e não tendenciosa dos filões, as estatísticas de  $PF$  obtidas das sondagens são as mais adequadas para condicionar os resultados das metodologias propostas de estimação e simulação.

As medidas de dispersão revelam valores mais baixos relativamente à variável possança no mesmo suporte, precisamente porque a regularização envolve o cálculo de médias móveis que ocorrem na mudança de suporte para a malha de blocos 50x50x30 m. A assimetria mantém-se positiva mas também é de magnitude inferior devido aos cálculos envolverem médias móveis.

Para terminar a análise estatística apresentam-se os resultados para a quantidade de volframite das sondagens, que são reportados classificados em 7 graus de quantidade de volframite (0, 1, 2, 3, 4, 5 e 6), onde 0 significa ausência de volframite e 6 significa as ocorrências mais abundantes. Na Figura 4.8 apresentam-se os histogramas de frequências relativas das classes de quantidade de volframite, por nível e globais.

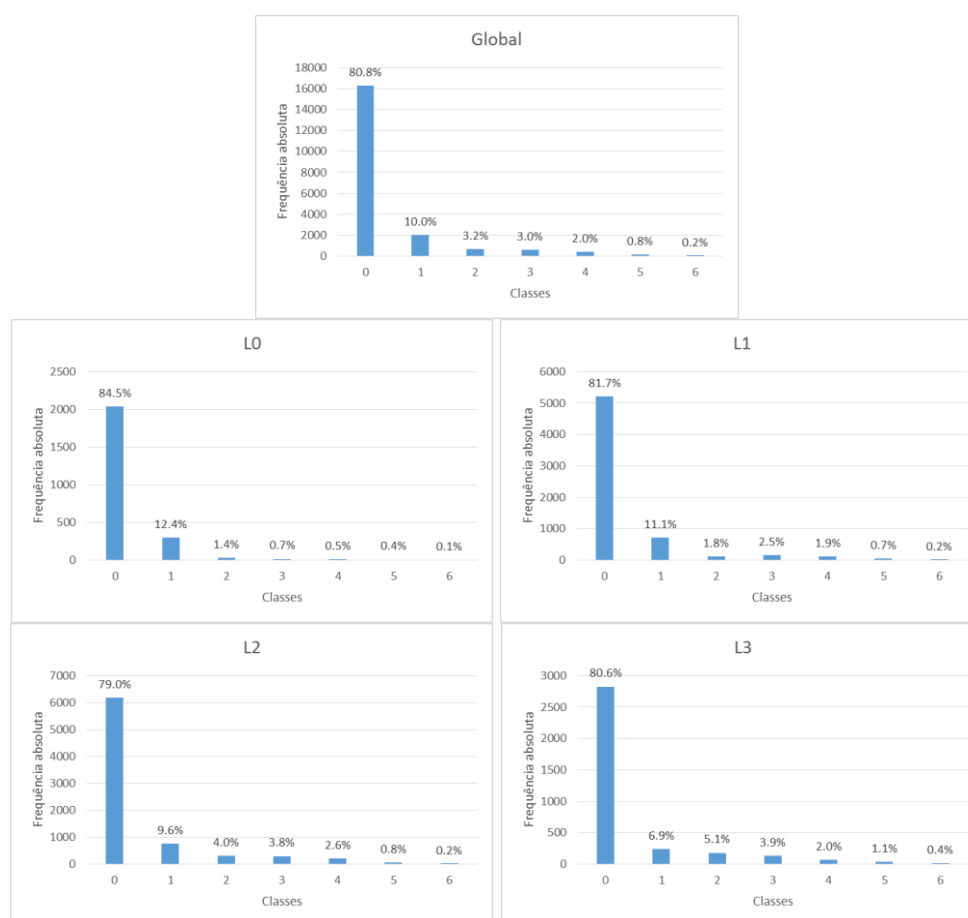


Figura 4.8 – Histogramas de frequências relativas das classes de quantidade de volframite nas sondagens, por nível L0, L1, L2 e L3 e globais.

Na Tabela 4.10 apresentam-se os resultados por nível da mina e globais das classes de quantidade de volframite, onde se apresenta o somatório das possanças de filão para cada classe, assim como a possança média.

Tabela 4.10 – Estatísticos das classes de quantidade de volframite por nível e globais medidas nas sondagens, onde se inclui a possança acumulada e a possança média.

Nível	Classe	Nº Filões	%	Possança total (cm)	Possança total (m)	Possança média (cm)
Global	0	16261	80,8%	168839,0	1688,4	10,4
	1	2009	10,0%	31278,6	312,8	15,6
	2	642	3,2%	10279,5	102,8	16,0
	3	610	3,0%	10018,5	100,2	16,4
	4	409	2,0%	7434,5	74,3	18,2
	5	158	0,8%	2952,5	29,5	18,7
	6	42	0,2%	677,0	6,8	16,1
	Total	20131		231479,6	2314,8	11,5
L0	0	2041	84,5%	15919,5	159,2	7,8
	1	300	12,4%	3400,0	34,0	11,3
	2	33	1,4%	383,0	3,8	11,6
	3	18	0,7%	316,0	3,2	17,6
	4	12	0,5%	200,0	2,0	16,7
	5	9	0,4%	93,0	0,9	10,3
	6	2	0,1%	21,0	0,2	10,5
	Total	2415		20332,5	203,3	8,4
L1	0	5212	81,7%	47952,5	479,5	9,2
	1	711	11,1%	10652,1	106,5	15,0
	2	114	1,8%	1644,0	16,4	14,4
	3	162	2,5%	2508,5	25,1	15,5
	4	120	1,9%	1856,0	18,6	15,5
	5	47	0,7%	826,0	8,3	17,6
	6	14	0,2%	271,0	2,7	19,4
	Total	6380		65710,1	657,1	10,3
L2	0	6182	79,0%	70648,0	706,5	11,4
	1	755	9,6%	13441,0	134,4	17,8
	2	315	4,0%	5124,5	51,2	16,3
	3	295	3,8%	4735,0	47,4	16,1
	4	206	2,6%	4078,5	40,8	19,8
	5	64	0,8%	1393,5	13,9	21,8
	6	13	0,2%	186,0	1,9	14,3
	Total	7830		99606,5	996,1	12,7
L3	0	2826	80,6%	34293,0	342,9	12,1
	1	243	6,9%	3785,5	37,9	15,6
	2	180	5,1%	3128,0	31,3	17,4
	3	135	3,9%	2459,0	24,6	18,2
	4	71	2,0%	1300,0	13,0	18,3
	5	38	1,1%	640,0	6,4	16,8
	6	13	0,4%	199,0	2,0	15,3
	Total	3506		45804,5	458,0	13,1

Estes resultados mostram que a classe 0 (ausência de volframite) é a predominante em cerca de 80% dos filões intersectados, seguindo-se a classe 1 com 10% e as restantes classes que somam em conjunto os restantes 10%.

Os resultados da análise estatística univariada das diferentes variáveis de sondagens e desmontes permitem retirar as seguintes conclusões que são importantes para a implementação das metodologias propostas:

- Existe uma enorme discrepância ou enviesamento de amostragem de cerca de 7x entre as medições de possanças nos desmontes  $PF^d$  e nas sondagens,  $PF^s$ ;
- Os níveis L1 e L2 são os mais ricos em volframite;
- Na variável classe de quantidade de volframite observada nas sondagens predominam as observações de classe 0 e 1 da variável categórica.

### 4.3 MORFOLOGIA

No presente capítulo pretende-se mostrar e comentar os resultados da metodologia de criação do modelo morfológico dos filões do depósito. A fim de se comparar mais facilmente os resultados, todas as imagens em perfil dizem respeito ao Px81 (projeção plano YoZ, com X = 805 m) e as imagens em planta ao Pz.75 (projeção XoY, com Z = 620 m). A Figura 4.9 mostra o enquadramento destes planos no volume da mina.

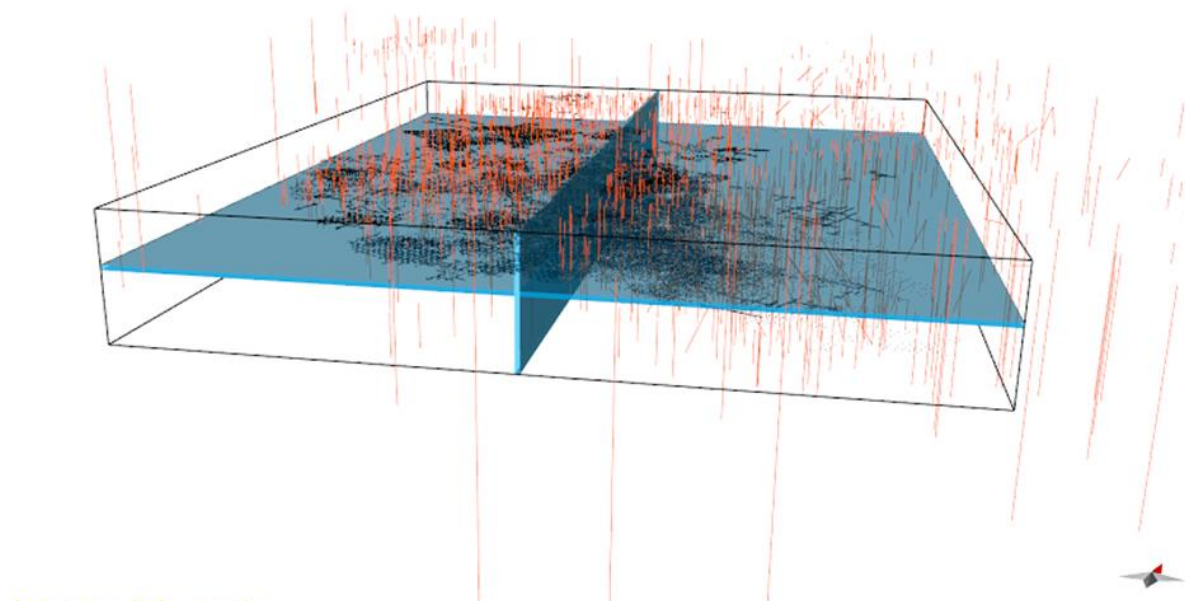


Figura 4.9 - Enquadramento do perfil Px81 e da planta Pz75 no volume da mina.

### 4.3.1 DEFINIÇÃO DA MALHA DE BLOCOS, VARIOGRAFIA E HISTOGRAMA GLOBAL DA PF<sup>S</sup>

Na primeira etapa da metodologia foram testadas várias dimensões de blocos para apoiar a regularização dos dados das sondagens, com base no ajuste dos variogramas obtidos. Como já referido no capítulo de explanação da metodologia, testaram-se as malhas 10x10x10m, 20x20x10m e 50x50x30m. Como as sondagens são praticamente todas verticais, a dimensão dos blocos na vertical faz a partição da sondagem em vários suportes. A dimensão horizontal permite que várias sondagens próximas passem a entrar com um valor médio, e assim resolvem-se contradições de valores entre sondagens próximas. A existência de variograma é uma condição para a aceitação da dimensão da malha de blocos, assim como a dimensão na vertical deve ser submúltipla da altura total dos 4 níveis da mina (270 m). Os dados das sondagens calculados para malhas de 10x10x10m e 20x20x10m não apresentam variogramas ajustáveis e resultaram num efeito de pepita puro que se pode observar na Figura 4.10. Refira-se que nestas malhas o número de sondagens que fazem média entre si é muito reduzido.

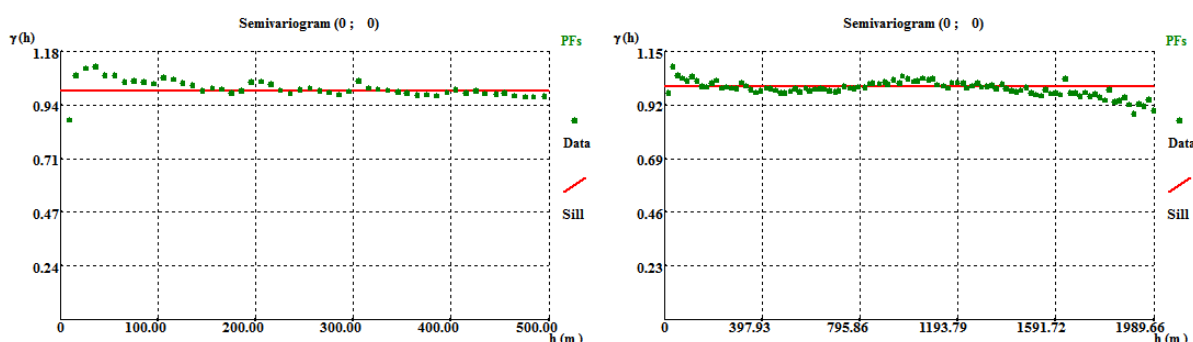


Figura 4.10 – Variogramas omnidirecionais da PF<sup>S</sup> calculados com a regularização das sondagens apoiada por uma malha de blocos com 10x10x10 m (esquerda) e 20x20x10 m (direita).

Testou-se então a regularização das sondagens apoiada por uma malha de blocos de muito maior dimensão 50x50x30m e calcularam-se variogramas experimentais nas direções horizontal e vertical com os parâmetros da Tabela 4.11. Os variogramas experimentais (calculados standardizados) mostram-se na figura 4.11 e permitiram ajustar modelos teóricos exponenciais com amplitudes de 350m na horizontal e 170 m na vertical, correspondendo ao Variograma<sup>S</sup> H e V mencionados na Figura 3.1. Refira-se que o ajustamento baseado na regularização dos dados apoiados por uma malha de blocos com 50x50x30m é inequívoco.



Tabela 4.11 – Parâmetros de cálculo e ajuste do variograma da  $PF^S$ .

Cálculo do variograma experimental						
Direções (Azimute; inclinação)	Tolerância		Passo		Variograma horizontal	
(0; 0)	180		50		25	
(0; 90)	5		30		-	
Ajuste do modelo teórico						
Direções (Azimute; inclinação)	C0	Modelo	C1	a1	C2	a2
(0; 0)	0	Exponencial	1	350	-	-
(0; 90)	0	Exponencial	1	170	-	-

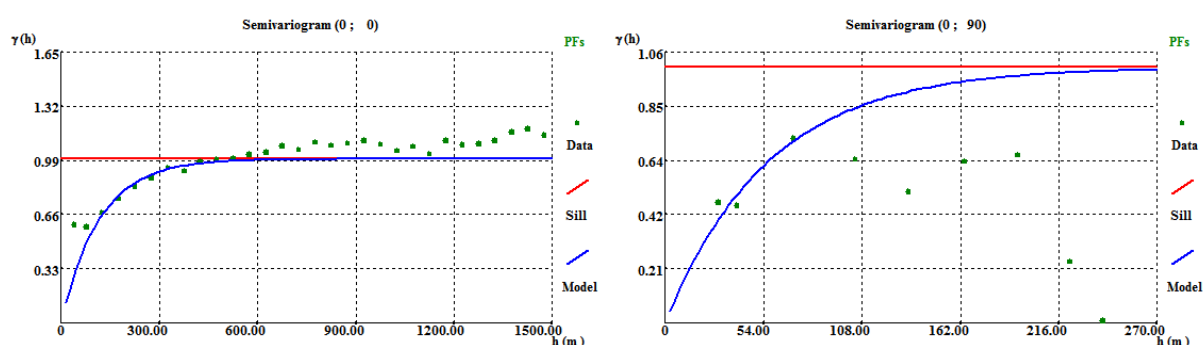


Figura 4.11 – Variogramas experimentais da  $PF^S$  para as direções horizontal e vertical e modelos teóricos ajustados do tipo exponencial.

#### 4.3.2 KRIGAGEM DA $PF^S$ NA MALHA 50X50X30 M

Foi aplicada a Krigagem da Indicatriz (KI) para gerar o histograma global da  $PF^S$  desagregado dos dados das sondagens e condicionar as simulações desta variável. Foram estimadas probabilidades para 20 classes de igual amplitude da  $PF^S$  tendo sido utilizado o variograma ajustado para a variável não transformada. A média obtida para o histograma desagregado é de 0,014, valor muito inferior à média dos dados 0,022, sendo esta diferença justificada pelo processo de desagrupamento das sondagens e inclusão no cálculo da média de zonas pouco ou não amostradas. Seguindo a metodologia de geração do modelo morfológico, efetuou-se a estimação por Krigagem Normal (KO) da  $PF^S$  na malha de blocos 50x50x30 m com os variogramas<sup>S</sup> H e V. Na Figura 4.12 apresentam-se os resultados da estimação para o perfil e nível indicados.

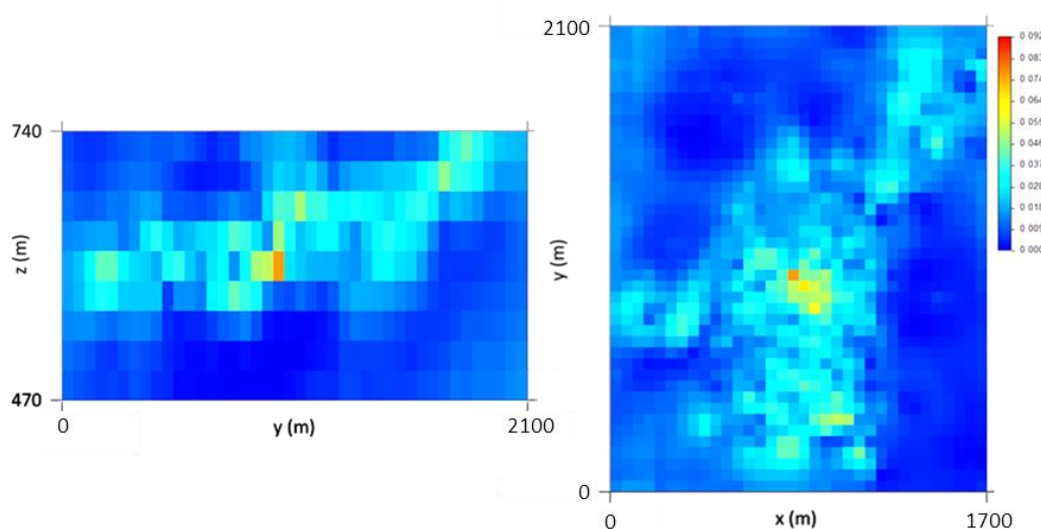


Figura 4.12 - Resultados da estimação por KO da PFS. Perfil YoZ (esquerda) e Planta XoY (direita).

#### 4.3.3 DESAGRUPAMENTO E VARIOGRAFIA DA $PF^d$ NA MALHA 10x10x2 M

A primeira etapa do fluxograma termina com o desagrupamento da  $PF^d$  dos desmontes feito por médias aritméticas apoiadas por uma malha de blocos com a dimensão de 10x10x2 m e cálculo e ajustamento dos variogramas. A Figura 4.13 apresenta os resultados do desagrupamento.

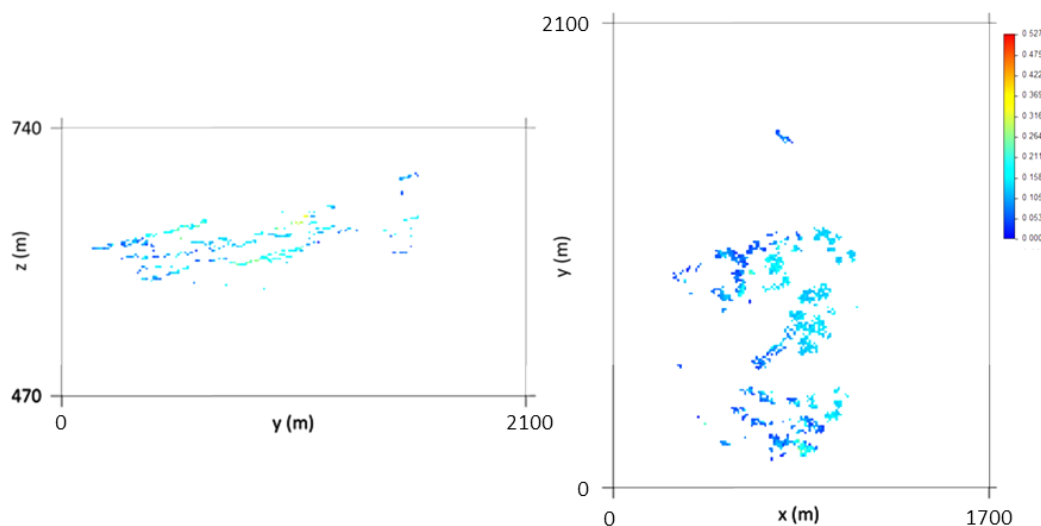
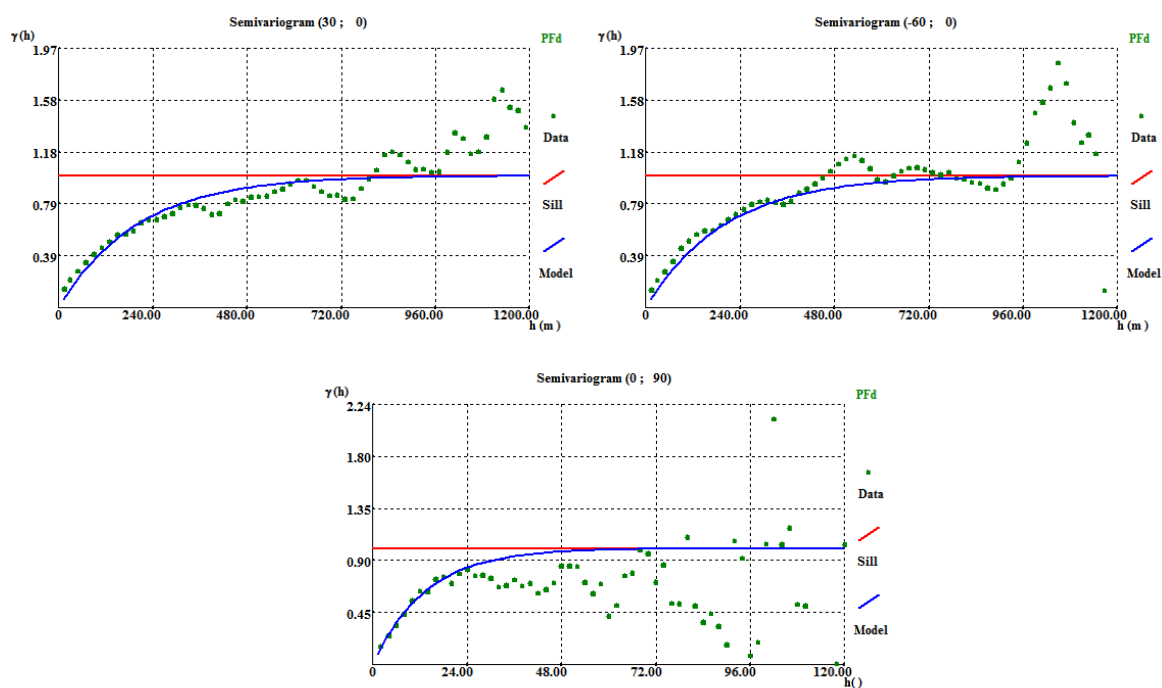


Figura 4.13 - Resultados do desagrupamento da  $PF^d$ . Perfil YoZ (esquerda) e Planta XoY (direita).

Calcularam-se os variogramas<sup>d</sup> H e V experimentais (também standardizados) da  $PF^d$  desagrupada. Os parâmetros de cálculo e ajuste dos variogramas encontram-se na Tabela 4.12. Na Figura 4.14 mostram-se os variogramas experimentais das 3 direções (NS, EW e vertical) e os modelos teóricos ajustados.

Tabela 4.12 – Parâmetros de cálculo e ajuste do variograma<sup>d</sup> da PF<sup>d</sup>.

Cálculo do variograma experimental						
Direções (Azimute; Inclinação)	Tolerância		Passo		Variograma Horizontal	
(30;0)	45		20		5	
(-60;0)	45		20		5	
(0;90)	5		32		-	
Ajuste do modelo teórico						
Direções (Azimute; Inclinação)	C0	Modelo	C1	a1	C2	a2
(30;0)	0	Exponencial	1	600	-	-
(-60;0)	0	Exponencial	1	600	-	-
(0;90)	0	Exponencial	1	40	-	-

Figura 4.14 - Ajuste dos variogramas<sup>d</sup> da PF<sup>d</sup> para as direções (30;0), (-60;0) e (0;90).

Os variogramas experimentais são de qualidade inequívoca. Foram ajustados com um modelo exponencial (tal como os dados das sondagens) e apresentam, nas duas direções horizontais, amplitudes de 600 m (isotrópicos na horizontal) e 40 m na vertical.

Os variogramas da variável PF<sup>d</sup> apresentam uma continuidade espacial elevada na horizontal relativamente aos calculados para a variável PF<sup>S</sup>. A razão mais provável está relacionada com o enviesamento inerente à amostragem nos desmontes, que segue os filões mineralizados resultando, por isso, em amplitudes artificialmente altas.

#### 4.3.4 1ª FASE DA SSD E CORREÇÃO DAS MÉDIAS NA MALHA 10x10x2 M

A segunda etapa do fluxograma começa com a SSD da PF na malha de 10x10x2m, condicional ao histograma desagrupado de  $PF^d$  e às médias locais da  $PF^D$  estimadas por KO (apresentada na secção 4.3.2). O ponto de partida para a SSD (informação principal) são os dados dos desmontes tal qual apresentados na Figura 4.13. Como existem muitas zonas da mina fracamente condicionadas foram geradas 1000 realizações. Os resultados da SSD de uma realização são apresentados na Figura 4.15

Tal como já referido, embora o algoritmo da SSD utilize a KSML para a estimação da média e da variância locais, os resultados quando agrupados para os blocos de 50x50x30m não têm exatamente a mesma média destes, por isso é necessário aplicar uma correção aos valores simulados (etapa 3 da metodologia) de forma a fazer coincidir as imagens simuladas com os dados das sondagens estimados na malha 50x50x30m. Na figura 4.16 mostra-se o resultado da imagem simulada após as correções. A tendência global é para que os valores simulados baixem mantendo fixos os valores nos blocos com os desmontes.

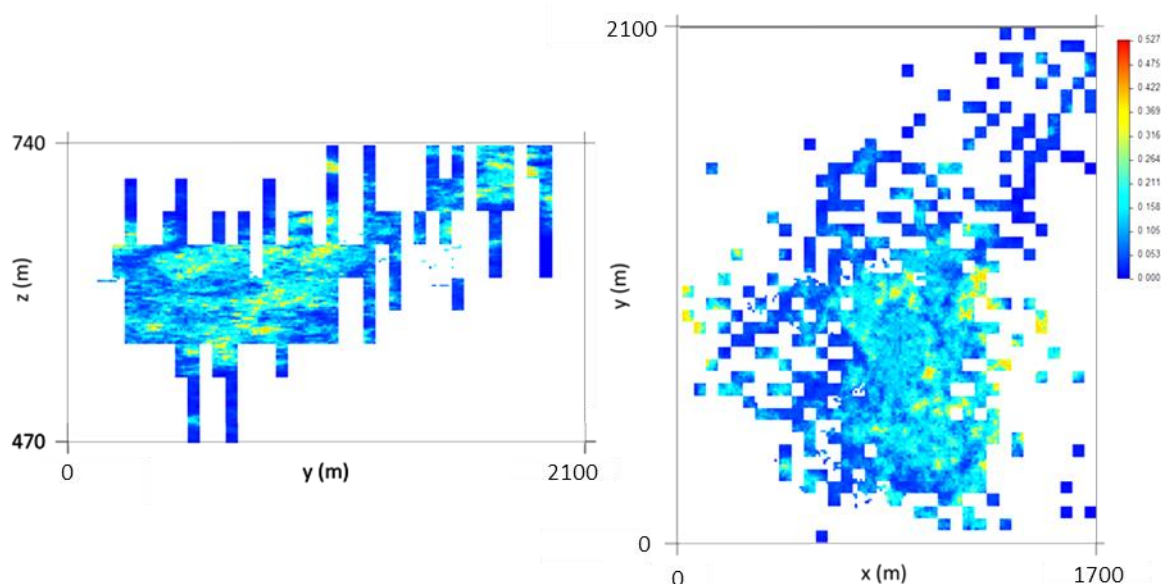


Figura 4.15 – Resultados da 1ª fase da SSD#1, ilustração de imagens de uma realização da PF. Perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).

#### 4.3.5 2ª FASE DA SSD NA MALHA 10x10x2 M E MODELO FINAL DE PF

A última etapa da metodologia é aplicar a SSD aos restantes blocos ainda não simulados na 1ª fase, agora sem condicionamento a informação secundária mas partindo dos resultados anteriores e mantendo o condicionamento ao histograma desagrupado da  $PF^d$  e à variografia<sup>d</sup> H e V. A Figura 4.17 corresponde a uma simulação final da PF na malha 10x10x2m.

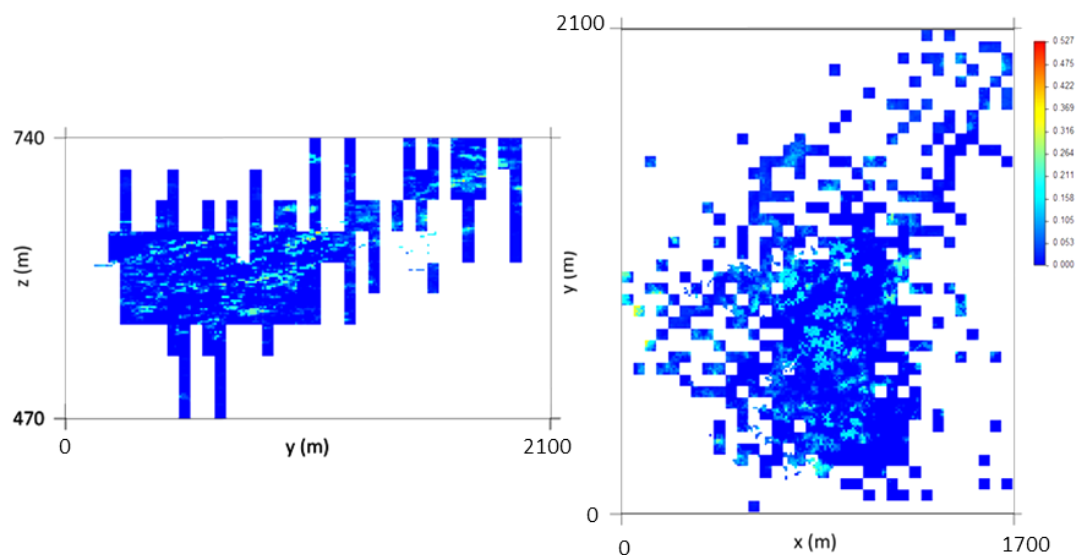


Figura 4.16 - Resultados da correção das médias para a imagem SSD #1. Perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).

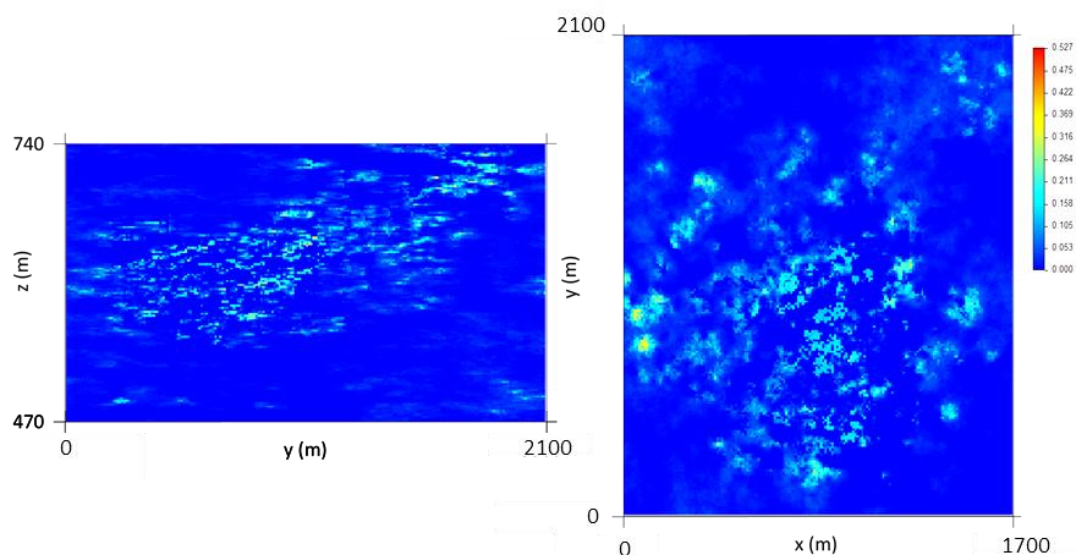


Figura 4.17 – Imagem final simulada como resultado da 2ª fase da SSD #1 da PF. Perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).

No final da última etapa é feito o agrupamento dos resultados da malha de 10x10x2m para a malha da mina de 10x10x10m; é calculada a imagem média das simulações e a imagem do coeficiente de variação (medida de dispersão / incerteza) em cada bloco do modelo (Figura 4.18), com base em 1000 simulações.

Pela análise da imagem média da simulação pode-se perceber que a zona de filões mais possantes coincide com a região central do depósito e com os níveis L1 e L2.

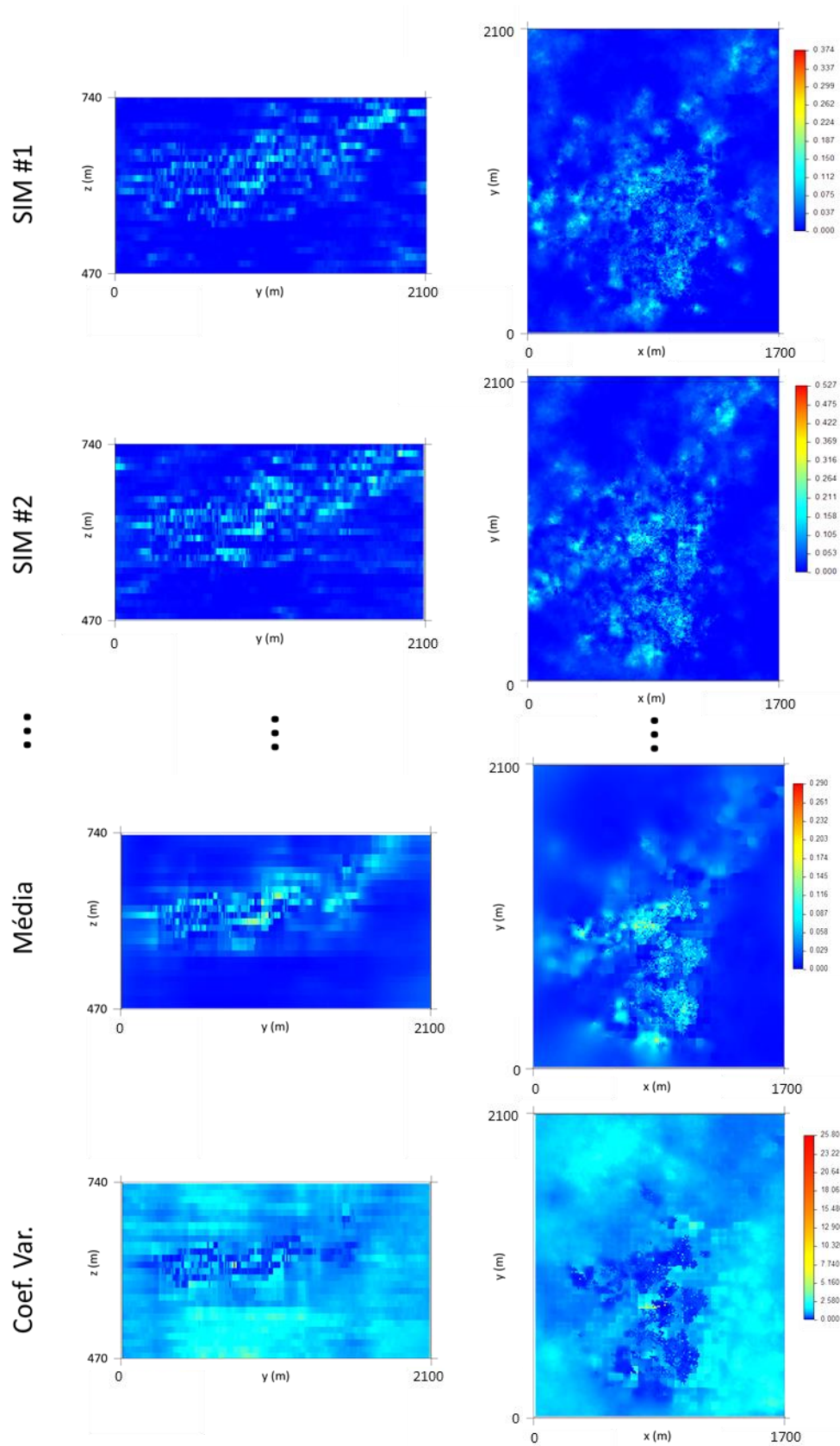


Figura 4.18 – Visualização em Perfil YoZ (esquerda) e Planta XoY (direita) de três realizações de PF já agrupadas para a malha de 10x10x10m.

A imagem dos coeficientes de variação mostra maior incerteza nas zonas periféricas, como esperado, e zeros no lugar dos desmontes, validando o processo de simulação, na medida em que todas as imagens geradas respeitam a informação de partida dos desmontes (PF<sup>d</sup>). A ocorrência pontual de valores de CV elevados na zona dos desmontes pode estar relacionada com grandes diferenças de valores em amostras muito próximas, forçando a simulação a gerar valores muito diferentes entre cada imagem. Outra razão pode estar relacionada com a correção das médias cujo efeito acumula ao anterior.

Depois de conseguidas as imagens finais da PF, por DSS, foram calculados os variogramas da imagem #1 de cada etapa da metodologia (Figura 4.19) e ajustados os modelos teóricos dos variogramas<sup>d</sup> iniciais, com 600 m de amplitude na horizontal (omnidirecional) e 40 m na vertical, de forma a verificar como as imagens reproduzem os variogramas.

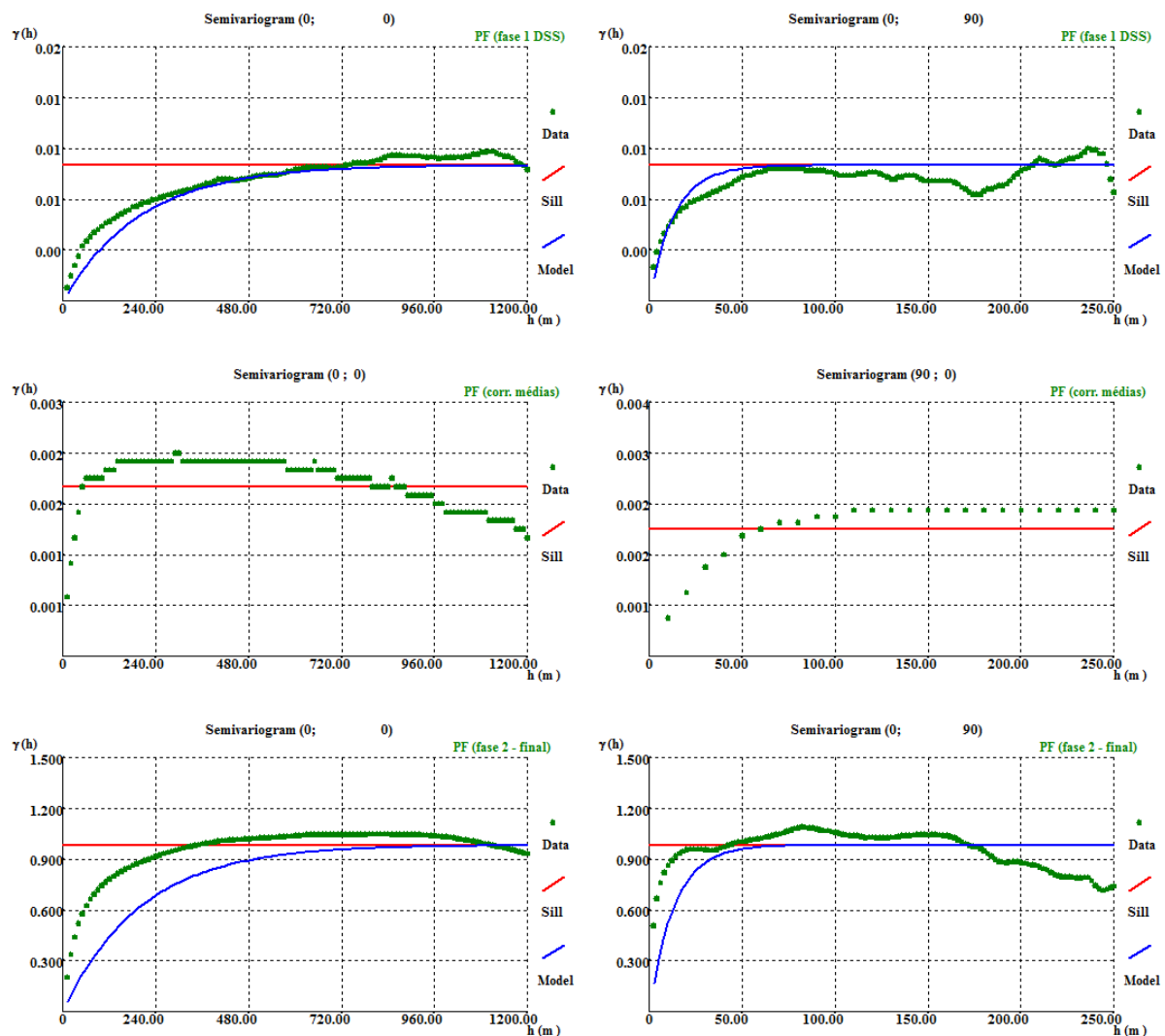


Figura 4.19 - Ajuste do modelo teórico dos variogramas<sup>d</sup> PF nos variogramas das várias etapas do modelo de PF. Direções (0;0) e (0;90).



Os variogramas da Figura 4.19 mostram que o modelo teórico ajustado no variograma<sup>d</sup>, inicial, apresenta alguma discrepância quando ajustado aos resultados das várias etapas. Após a fase 1 da DSS, o variograma calculado respeita aceitavelmente a estrutura que foi imposta inicialmente; após a correção das médias, aplicada na Etapa 3 da metodologia, o resultado final é uma imagem onde a continuidade espacial baixa bastante. A única razão é serem efetuadas correções a alguns valores mantendo os valores dos locais com desmontes, força-se assim o aumento da discrepância entre informação próxima espacialmente, e consequentemente distorce-se o variograma imposto (Figura 4.19 – PF (corr. Médias)). Na Etapa 4, ao aplicar a DSS aos restantes blocos, o variograma é novamente imposto mas os blocos remanescentes já não são suficientes para que a imagem total reproduza o variograma ajustado aos dados. O resultado mostra que a distorção resultante da correção das médias influencia o resultado final (Figura 4.19 – PF (fase 2 - final)). Esta situação voltará a ser comentada nas considerações finais acerca das opções possíveis para minimizar esta questão.

Nas figuras 4.20 e 4.21 mostram-se representações 3D da média e coeficiente de variação calculados com as 1000 realizações por SSD da PF.

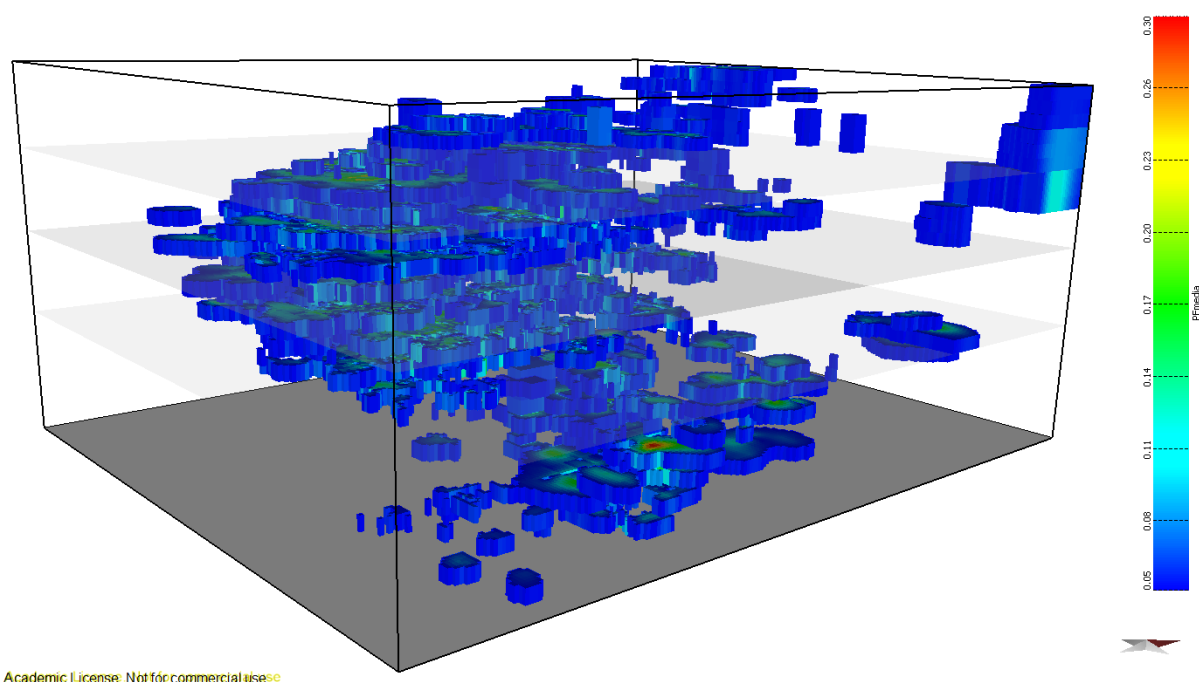


Figura 4.20 – Representação 3D da imagem média das realizações da PF por SSD na malha de blocos de 10x10x10m. Apenas estão visíveis blocos com valor médio superior a 0,05 (5% de volume em filão).



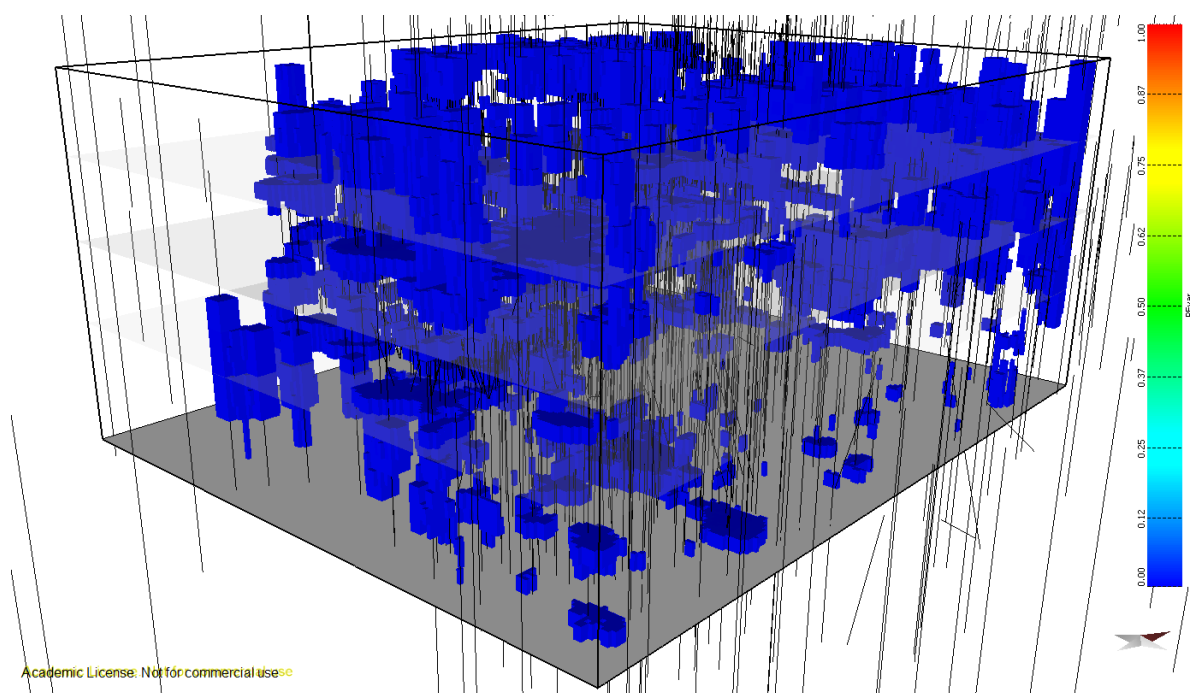


Figura 4.21 – Representação 3D do coeficiente de variação das realizações de PF por SSD na malha de blocos de 10x10x10m. Apenas estão visíveis os 10% de blocos com menor incerteza calculada.

Depois de conseguidos os modelos de PF foram calculadas curvas relativas ao volume acumulado de filão por proporção de filão (Figura 4.22) e ao volume total de filão por cota da mina (Figura 4.23), na malha de 10x10x10 m.

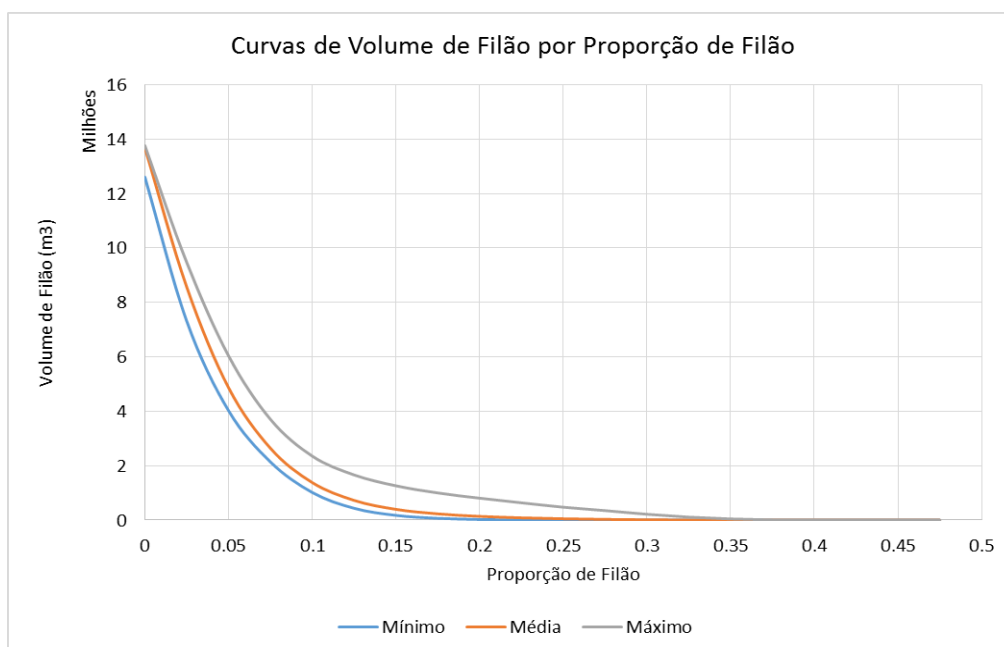


Figura 4.22 – Curvas relativas do volume acumulado de filão por proporção de filão, apresentam-se os valores mínimos, médios e máximos das 1000 realizações da PF.

Da análise do primeiro conjunto de curvas é possível perceber que o volume total estimado de filões é de  $13,7 \text{ Mm}^3$ , relativamente às simulações os cenários extremos variam entre  $13,8 \text{ Mm}^3$  e  $12,6 \text{ Mm}^3$ . O valor mínimo é anômalo comparativamente ao conjunto das simulações, que excluindo este valor se apresenta entre  $13,2 \text{ Mm}^3$  e  $13,7 \text{ Mm}^3$ . O decréscimo do volume total de filão é acentuado para cortes inferiores 0.1, diminuindo essa tendência para cortes mais altos, percebendo-se, assim, que a maioria do volume se concentra em filões até 0,5 m. Os resultados mostram ainda que não existem blocos simulados com mais de 40% de filão.

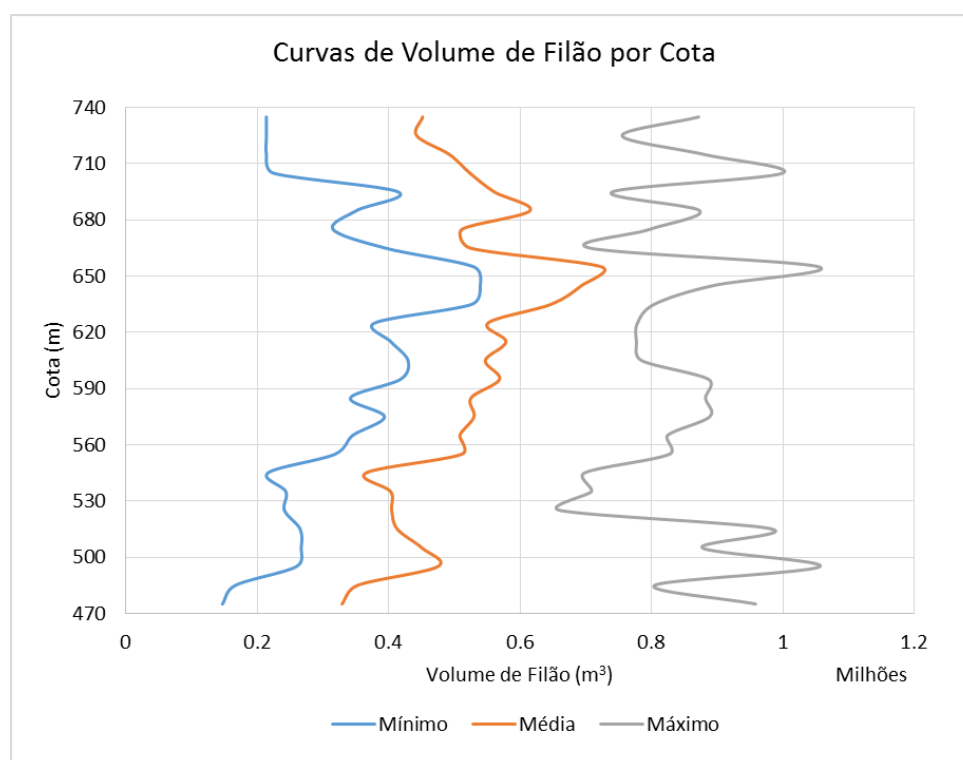


Figura 4.23 – Curvas relativas ao volume total de filão (valores mínimos, médio e máximos) por cota da mina.

As curvas de volume de filão por nível (Figura 4.23) indicam que o nível com mais volume de filões é o L1, apresentando também a menor amplitude de resultados (menor incerteza). A variabilidade dos resultados é mais elevada nas cotas superiores da mina, diminuindo para o nível L1 e voltando a aumentar em profundidade.

Os dados iniciais apresentavam um aumento consistente da PF média em profundidade, no entanto, a informação de partida está concentrada na zona central do modelo, e com quantidades de amostras diferentes em cada nível. A simulação cobre um volume da mina mais extenso do que os dados e gera valores tendencialmente mais baixos na periferia do modelo (zonas com menos filões), fazendo com que, por exemplo, para o nível L3 com poucas amostras e pouca área amostrada, a tendência observada inicialmente seja anulada.

## 4.4 QUANTIDADE DE VOLFRAMITE

Neste capítulo pretende-se apresentar de forma ilustrada e comentada o desenvolvimento da metodologia dedicada à criação do modelo de quantidade de volframate do depósito. As imagens em secção e em nível corresponderão, novamente, ao Px81 (perfil YoZ, com  $X = 805$  m) e Pz.75 (planta XoY, com  $Z = 620$  m) enquadrados na Figura 4.9.

Os dados de quantidade de volframate apresentados e os resultados, por questões de confidencialidade, estão uniformizados para o intervalo  $[0, 1]$ .

### 4.4.1 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE A QUANTIDADE DE VOLFRAMITE NOS DESMONTES E AS CLASSES DE QUANTIDADE DE VOLFRAMITE DAS SONDAGENS

A primeira etapa da metodologia inicia-se com a análise da correlação entre a quantidade de volframate dos desmontes e as classes de quantidade de volframate das sondagens o que permitirá agrupar as classes de quantidade de volframate de sete para as duas que evidenciem a melhor discriminação possível. Para que a quantidade de volframate seja trabalhada de forma independente da possança dos filões, as quantidades de volframate foram recalculadas de  $\text{kg/m}^2$  para  $\text{kg/m}^3$  (divisão da quantidade de volframate reportada pela possança dos filões).

Foram construídos histogramas condicionais cumulativos globais da quantidade de volframate para cada classe de quantidade de volframate, conforme descrito em 3.2.2. A análise dos resultados revelou que as curvas que melhor discriminam a quantidade de volframate são as das classes 0, 1 e 2 e que existe pouca discriminação entre as restantes classes 3, 4, 5 e 6. Para melhorar a análise construíram-se histogramas cumulativos condicionais aos dados contidos no intervalo de cotas do nível L0 (ver Figura 4.24).

Pela observação dos resultados confirma-se que as curvas que melhor discriminam a quantidade de volframate são as das classes 0, 1 e 2 mas o grau de discriminação é globalmente fraco, embora seja mais evidente do que quando são considerados todos os níveis da mina. A proposta de agrupamento para duas classes de quantidade de volframate é juntar as classes  $\{0-1-2\}$  e as restantes  $\{3-4-5-6\}$  e que o estudo se realizaria por nível, numa tentativa de melhorar a discriminação entre as duas categorias definidas. A Figura 4.25 refere-se às curvas obtidas para as classes agrupadas nos diferentes níveis.

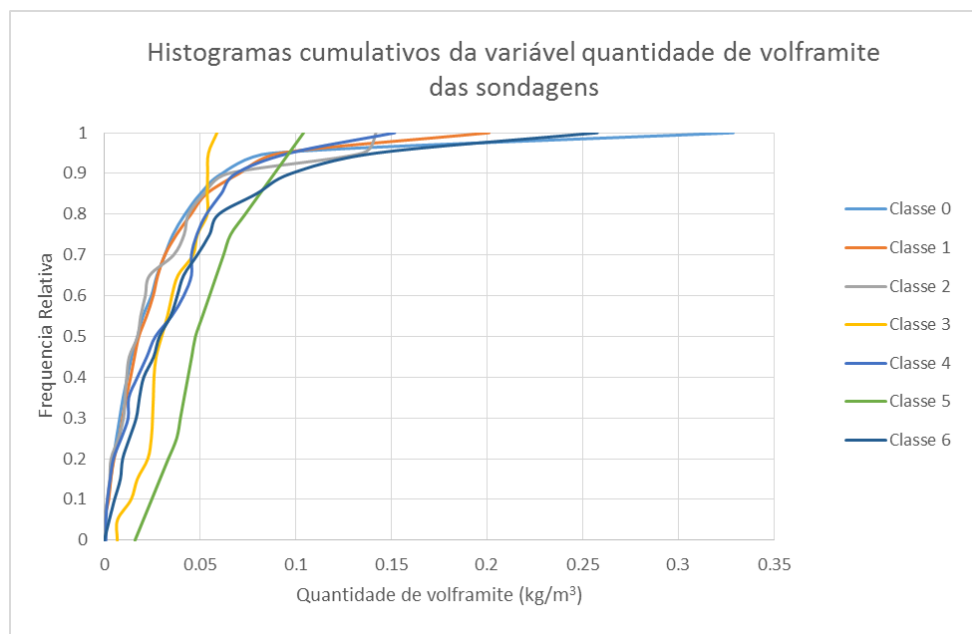


Figura 4.24 – Histogramas condicionais cumulativos da quantidade de volframite reportada nos desmontes às classes de quantidade de volframite reportadas nas sondagens no nível da mina L0.

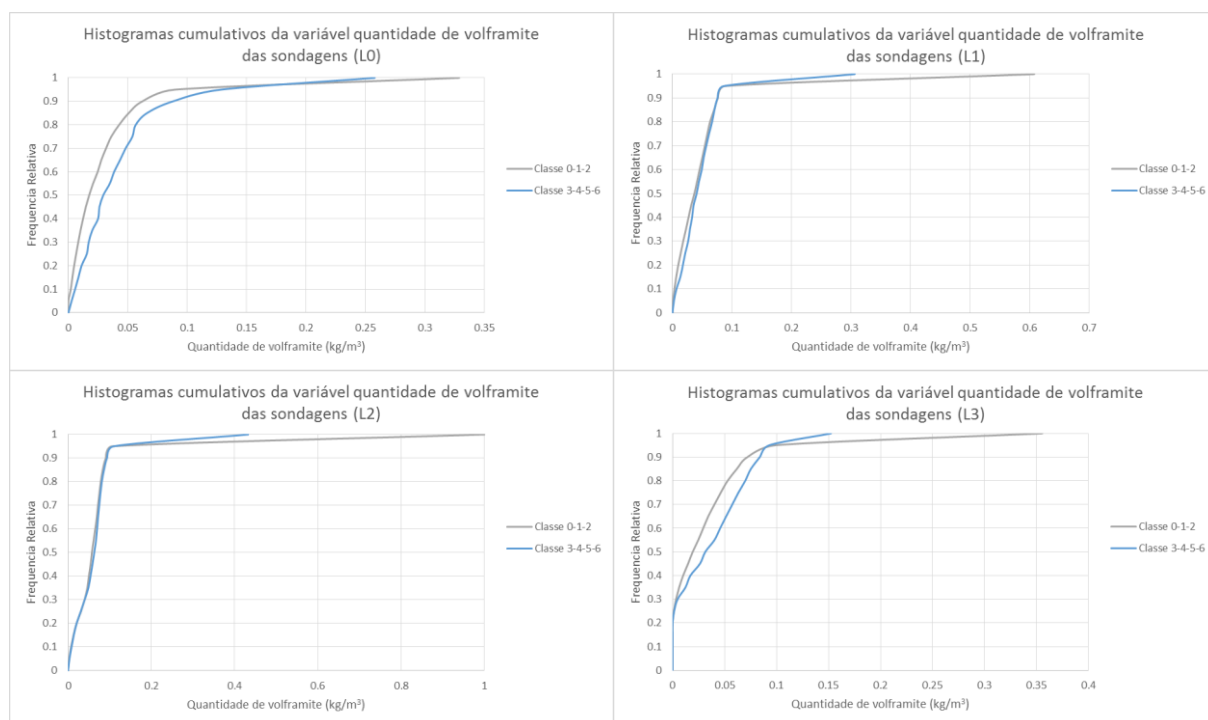


Figura 4.25 – Histogramas condicionais cumulativos da quantidade de volframite reportada nos desmontes às classes de quantidade de volframite reportadas nas sondagens por nível da mina L0, L1, L2 e L3.

Os histogramas cumulativos da Figura 4.25 revelam que os níveis com melhor discriminação das classes são o L0 e o L3 e que os restantes L1 e L2 têm discriminação praticamente nula.

Seria de esperar que as classes de quantidade de volframite reportadas nas sondagens tivessem uma maior correlação com os dados dos desmontes mas tal não acontece, e as possíveis razões são várias, onde se incluem diferentes técnicos procedem à classificação de classes de quantidade de volframite nas sondagens, demasiada aleatoriedade na ocorrência da volframite nos filões que é mal capturada pelas sondagens, e também porque as duas fontes de informação não são nunca colocadas. Mesmo assim parece existir vantagem em utilizar a metodologia proposta para os níveis L0 e L3, e aqui é importante referir que a metodologia incorpora a influência da variável secundária nos resultados e que para os níveis L1 e L2 os resultados obtidos serão iguais aos que seriam obtidos só com a informação dos desmontes.

Doravante, as classes agrupadas passam a ser designadas por  $C_1$ , quando referente ao agrupamento das classes  $\{0, 1, 2\}$  e  $C_2$  para as restantes.

#### 4.4.2 KRIGAGEM DA INDICATRIZ DAS CLASSES AGRUPADAS NA MALHA 50x50x30 M

Na aplicação desta metodologia recorre-se às malhas de blocos definidas para o suporte dos desmontes 10x10x2m e sondagens 50x50x30m.

Na etapa 2 da metodologia da quantidade de volframite é aplicada a KI para estimar a probabilidade de cada bloco da malha 50x50x30 m de pertencer à classe  $C_1$  e ao seu complementar  $C_2$ . Como são utilizadas duas classes, basta estimar a  $\text{Prob}\{C_1\}$ , e então  $\text{Prob}\{C_2\} = 1 - \text{Prob}\{C_1\}$ .

Previamente à KI, foram calculados e ajustados variogramas da variável indicatriz cujos parâmetros de cálculo e ajustamento estão discriminados na Tabela 4.13. O ajuste foi feito com uma estrutura e modelo exponencial, revelando amplitudes de 70 m na horizontal e 50 m na vertical. Os variogramas experimentais e os respetivos modelos teóricos são apresentados na Figura 4.26.

Tabela 4.13 – Parâmetros de cálculo e ajuste do variograma das classes de quantidade de volframite segundo uma variável do tipo indicatriz.

Cálculo do variograma experimental						
Direções (Azimute; Inclinação)	Tolerância		Passo		Variograma Horizontal	
(0;0)	180		50		25	
(0;90)	5		30		-	
Ajuste do modelo teórico						
Direções (Azimute; Inclinação)	C0	Modelo	C1	a1	C2	a2
(0;0)	0	Exponencial	1	70	-	-
(0;90)	0	Exponencial	1	50	-	-

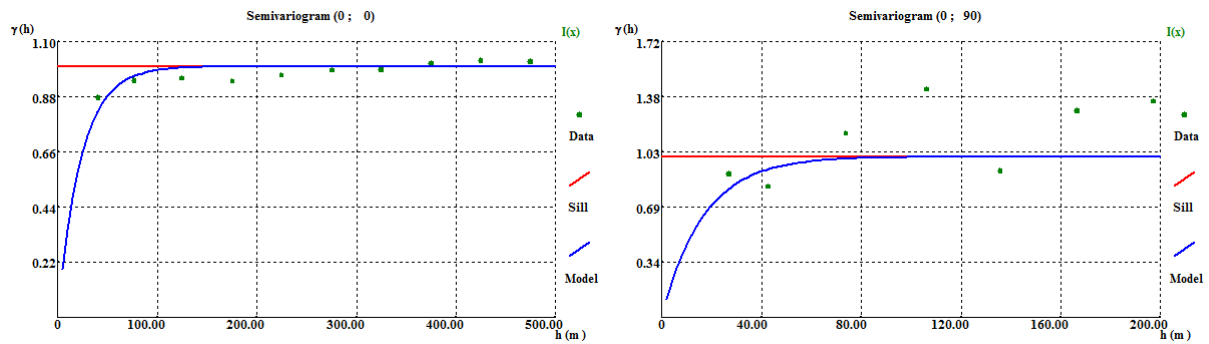


Figura 4.26 – Variogramas experimentais e modelo teórico ajustado à variável indicatriz definida com base nas duas classes de quantidade de volframate  $C_1$  e  $C_2$  reportados nas sondagens para as direções (0;0) e (0;90).

Os resultados da KI para os dois conjuntos de classes  $C_1$  e  $C_2$  estão ilustrados na Figura 4.27 para o nível e perfil já referenciados. Os resultados refletem a muito maior probabilidade de ocorrência das classes agrupadas em  $C_1$ , que exibe um valor médio de 0,938, valor muito próximo dos dados iniciais (0,940). Importa ainda referir que para Norte os valores estimados são de aproximadamente 100% de probabilidade de pertença a  $C_1$ , que é a classe onde se espera menor quantidade de volframate.

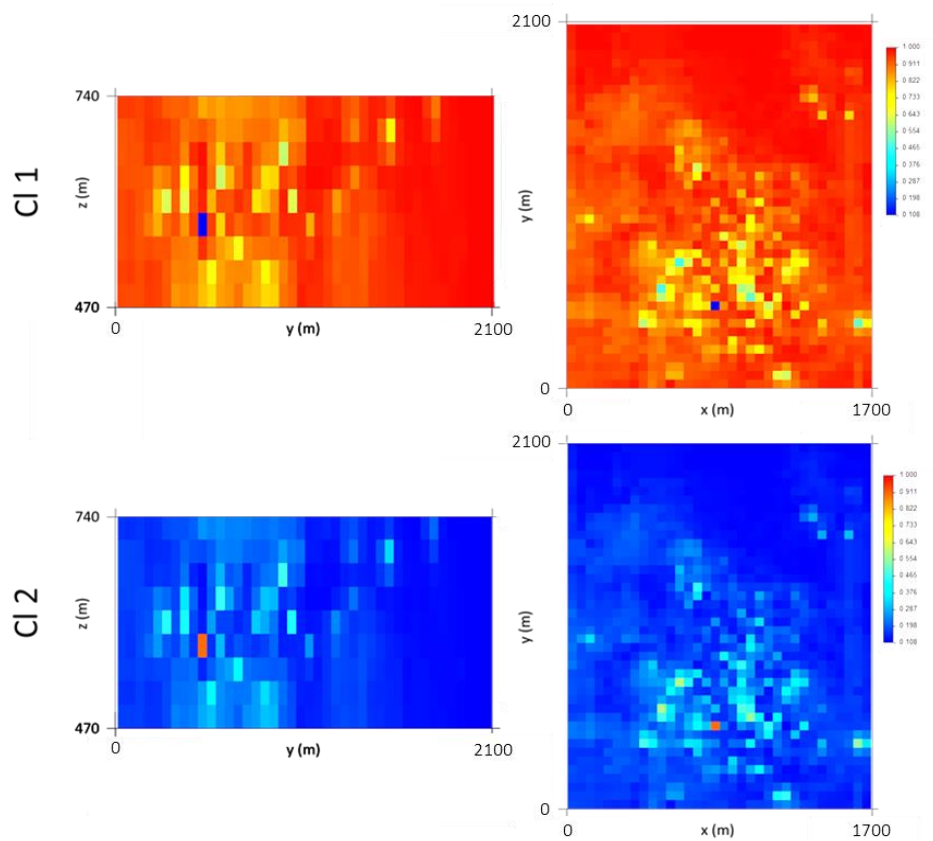


Figura 4.27 – Resultado da KI para os dois conjuntos de classes  $C_1$  e  $C_2$ . Perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).

#### 4.4.3 SSD DA QUANTIDADE DE VOLFRAMITE CONDICIONADOS A $C_1$ E $C_2$ COM HISTOGRAMAS POR NÍVEL NA MALHA 10X10X2M

Na etapa 3 da metodologia aplicou-se a SSD para gerar imagens de quantidade de volframite condicionais aos conjuntos de classes  $C_1$  e  $C_2$ , com histogramas condicionais da quantidade de volframite por nível. Os histogramas condicionais que entram na SSD foram obtidos na etapa 1.

Para serem utilizados na SSD como informação principal, as quantidades de volframite dos desmontes foram categorizadas em  $C_1$  ou  $C_2$ , consoante a classe do filão de sondagem mais próximo do desmorte, tendo-se limitado a pesquisa à distância de 50 m na horizontal e 15 m na vertical. Esta categorização permitiu separar a quantidade de volframite em dois ficheiros,  $C_1$  ou  $C_2$ . Para que os resultados da SSD sejam condicionais a todos os registos de quantidade de volframite nos desmontes, os registos que não têm nenhum filão dentro da área de condição foram adicionados aos dois ficheiros.

Os variogramas<sup>d</sup> são calculados para o conjunto total dos dados de quantidade de volframite ( $\text{kg/m}^3$ ) medidos nos desmontes (antes da classificação). Os parâmetros utilizados no cálculo e ajuste dos variogramas encontram-se na Tabela 4.14 e na Figura 4.28 mostram-se os variogramas experimentais e os modelos teóricos da quantidade de volframite que foram calculados com todas as medições de quantidade de volframite em simultâneo. Os variogramas da quantidade de volframite nos desmontes foram ajustados com 30% de efeito de pepita e uma amplitude de 500 m na horizontal e 60m na vertical.

Tabela 4.14 – Parâmetros de cálculo e ajuste do variograma<sup>d</sup> da quantidade de volframite.

Cálculo dos variogramas experimentais						
Direções (Azimute; Inclinação)	Tolerância		Passo		Variograma horizontal	
(0;0)	180		10		1	
(0;90)	5		8		-	
Ajuste do modelo teórico						
Direções (Azimute; Inclinação)	C0	Modelo	C1	a1	C2	a2
(0;0)	0.3	Esférico	0.7	500	-	-
(0;90)	0.3	Esférico	0.7	60	-	-

Foram geradas 200 imagens de quantidade de volframite condicionais a cada classe ( $C_1$  e  $C_2$ ) de forma a construir os histogramas cumulativos condicionais para cada bloco (leis de distribuição locais bloco a bloco). A Figura 4.29 mostra uma realização de quantidade de volframite condicional aos conjuntos de classes  $C_1$  e  $C_2$ . Nestas imagens observa-se muito facilmente que ocorrem valores erráticos mais altos no meio de valores muito baixos, que são a influência do efeito de pepita. Nas imagens em perfil observa-se ainda a ocorrência de quantidade de volframite em média mais elevados no nível L2, o que é fruto da utilização na DSS de histogramas por nível.

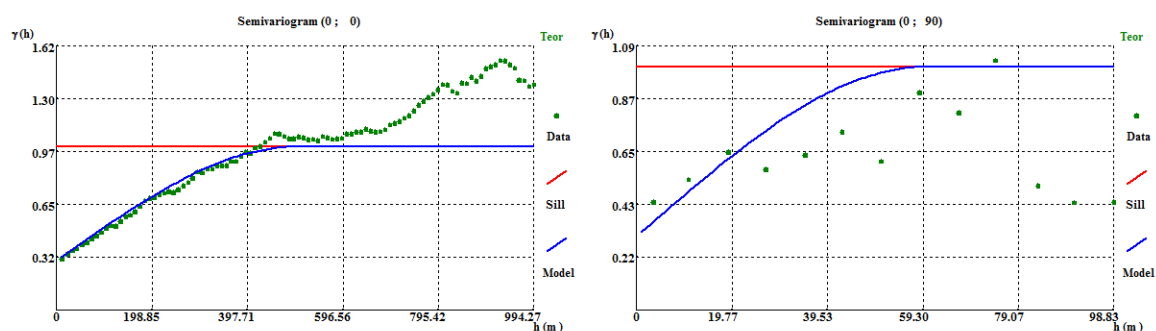


Figura 4.28 – Variogramas experimentais da quantidade de volframate reportada nos desmontes e modelo teórico do variogramas<sup>d</sup> para as direções horizontal (0;0) e vertical (0;90).

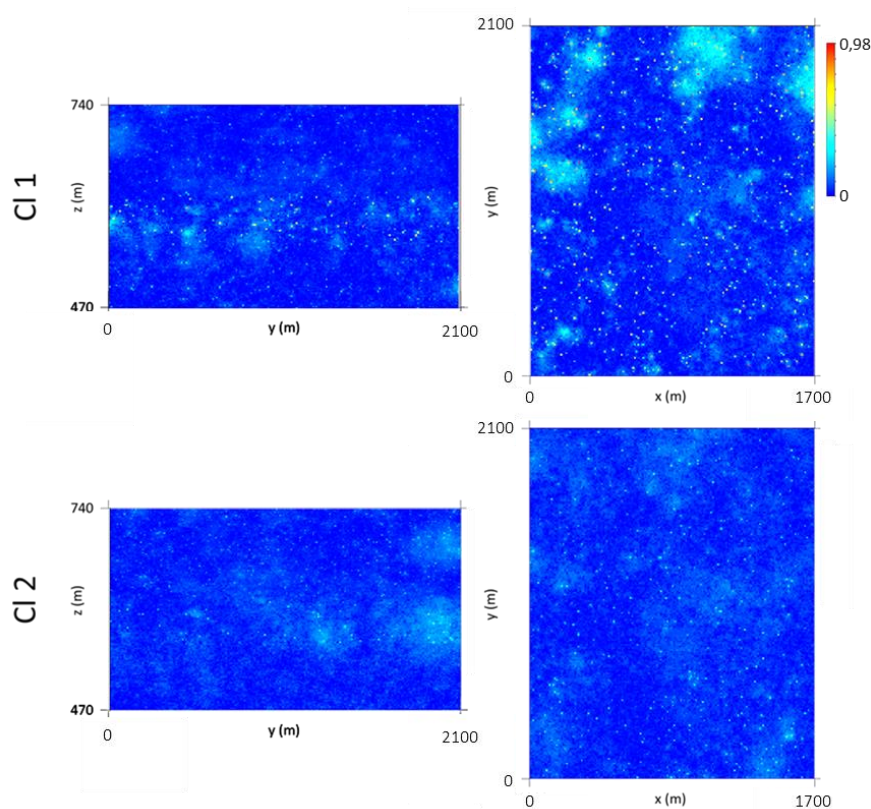


Figura 4.29 – Resultado da SSD #1 da quantidade de volframate condicional às classes  $C_1$  e  $C_2$  em perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).

À semelhança do procedido na primeira metodologia, para validação de resultados foram calculados os variogramas da imagem #1 gerada por SSD, condicionais a  $C_1$  e a  $C_2$  e ajustados os modelos teóricos dos variogramas<sup>d</sup> iniciais (Figura 4.30), com 500 m de amplitude na horizontal (omnidirecional) e 60 m na vertical, mais os 30% de efeito de pepita.



Os variogramas da quantidade de volframate simulados das duas classes apresentam comportamentos semelhantes, nomeadamente na discrepância que é observada relativamente ao modelo ajustado inicialmente. Esta diferença em ambas as direções, horizontal e vertical, pode ser explicada devido ao variograma<sup>d</sup> da quantidade de volframate ser calculado e ajustado para o conjunto total dos dados e a simulação condicional da quantidade de volframate às duas classes é feita em separado.

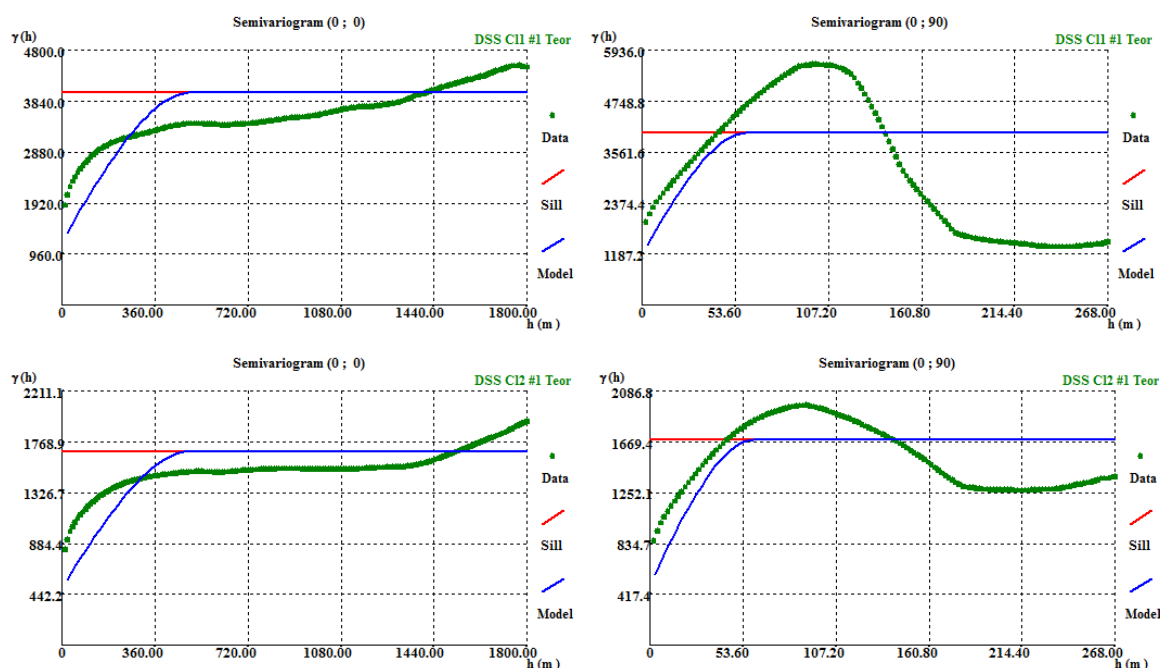


Figura 4.30 - Ajuste do modelo teórico dos variogramas<sup>d</sup> da quantidade de volframate nos variogramas das DSS da C11 e C12. Direções (0;0) e (0;90).

#### 4.4.4 GERAÇÃO DAS LEIS DE DISTRIBUIÇÃO DA QUANTIDADE DE VOLFRAMITE PARA CADA BLOCO DA MALHA

Na etapa 4 recorreu-se ao procedimento de Monte Carlo para gerar leis de distribuição locais, por bloco, da quantidade de volframate, cruzando as probabilidades estimadas por KI de cada bloco pertencer a uma classe  $C_1$  ou  $C_2$  e os histogramas cumulativos locais das classes  $C_1$  e  $C_2$  que podem ser construídos com os valores simulados da quantidade de volframate em cada bloco. Para ilustrar este procedimento, na Figura 4.31 mostram-se as leis de distribuição cumulativas para um bloco construídas com os resultados das 200 realizações de quantidade de volframate, para  $C_1$  e  $C_2$ . Para gerar a lei compósita simulam-se valores dos 2 histogramas individuais das classes  $C_1$  e  $C_2$  em proporções iguais às probabilidades estimadas. Para este bloco em particular as probabilidades estimadas são 0,9159 e 0,0841 pelo que se o histograma compósito for amostrado por 100 valores geram-se 92 valores de quantidade de volframate do histograma de  $C_1$  e 8 valores do histograma de  $C_2$  por Monte Carlo. Na figure 4.31 mostra-se o histograma compósito resultante para este bloco. Aqui

neste caso em particular, a curva obtida tem uma enorme influência de  $C_1$ , pelo que estas duas são quase iguais.

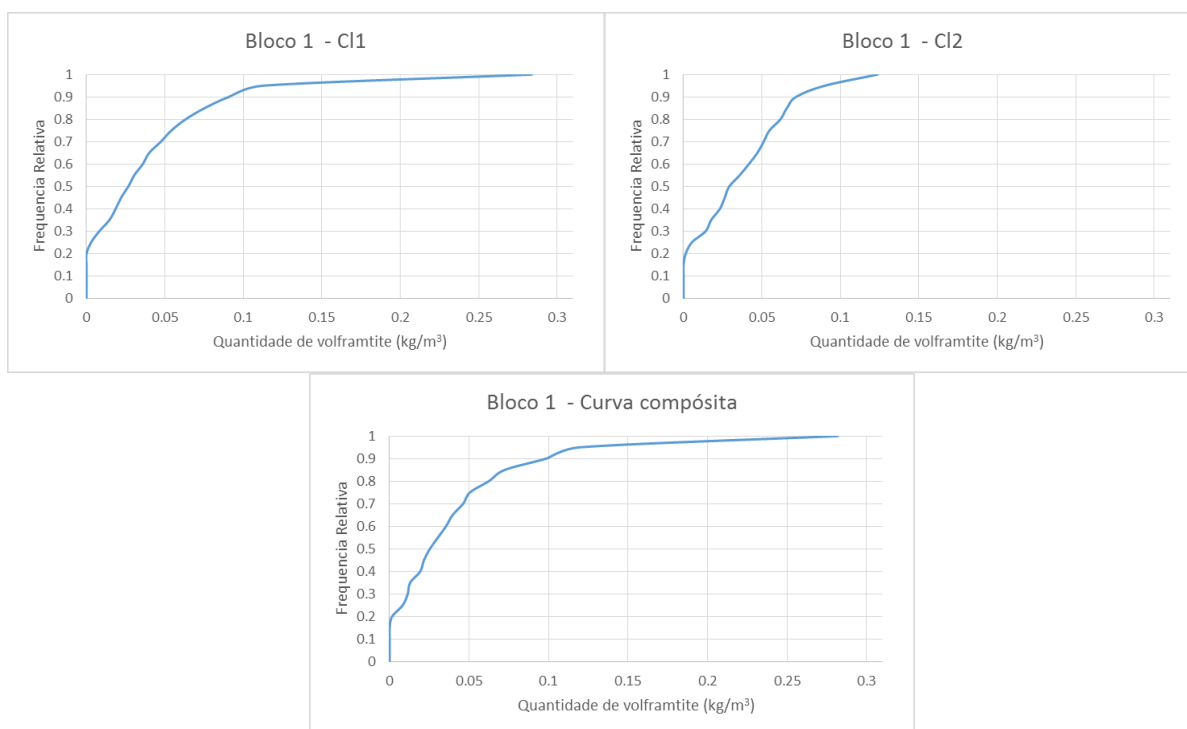


Figura 4.31 – Histogramas cumulativos de quantidade de volframite construídos com os valores das 200 realizações para um bloco da malha de blocos (esquerda)  $C_1$ , (direita)  $C_2$  e histograma cumulativo composto obtido por Monte Carlo.

#### 4.4.5 SIMULAÇÃO DAS IMAGENS FINAIS DE QUANTIDADE DE VOLFRAMITE NA MALHA DE 10X10X2M E MODELO FINAL

Na última etapa da metodologia são gerados os mapas finais de quantidade volframite com recurso ao algoritmo de Simulação por Campos de Probabilidade ou *Probability Field Simulation* (PFS).

Como os variogramas exibem efeito de pepita significativo, para explorar o espaço de incerteza foram geradas 1000 realizações de quantidade volframite na malha 10x10x2 m. Para o efeito foram preparadas 1000 imagens de probabilidades com lei de distribuição uniforme  $U[0,1]$  por transformação de imagens com lei de distribuição Gaussiana geradas por SSG e utilizando um variograma igual ao da quantidade volframite medida nos desmontes, variogramas<sup>d</sup> H e V.

Na figura 4.32 mostram-se resultados de uma realização da SSG, a transformação para lei uniforme e a imagem de quantidade volframite geradas por aplicação direta da PFS.

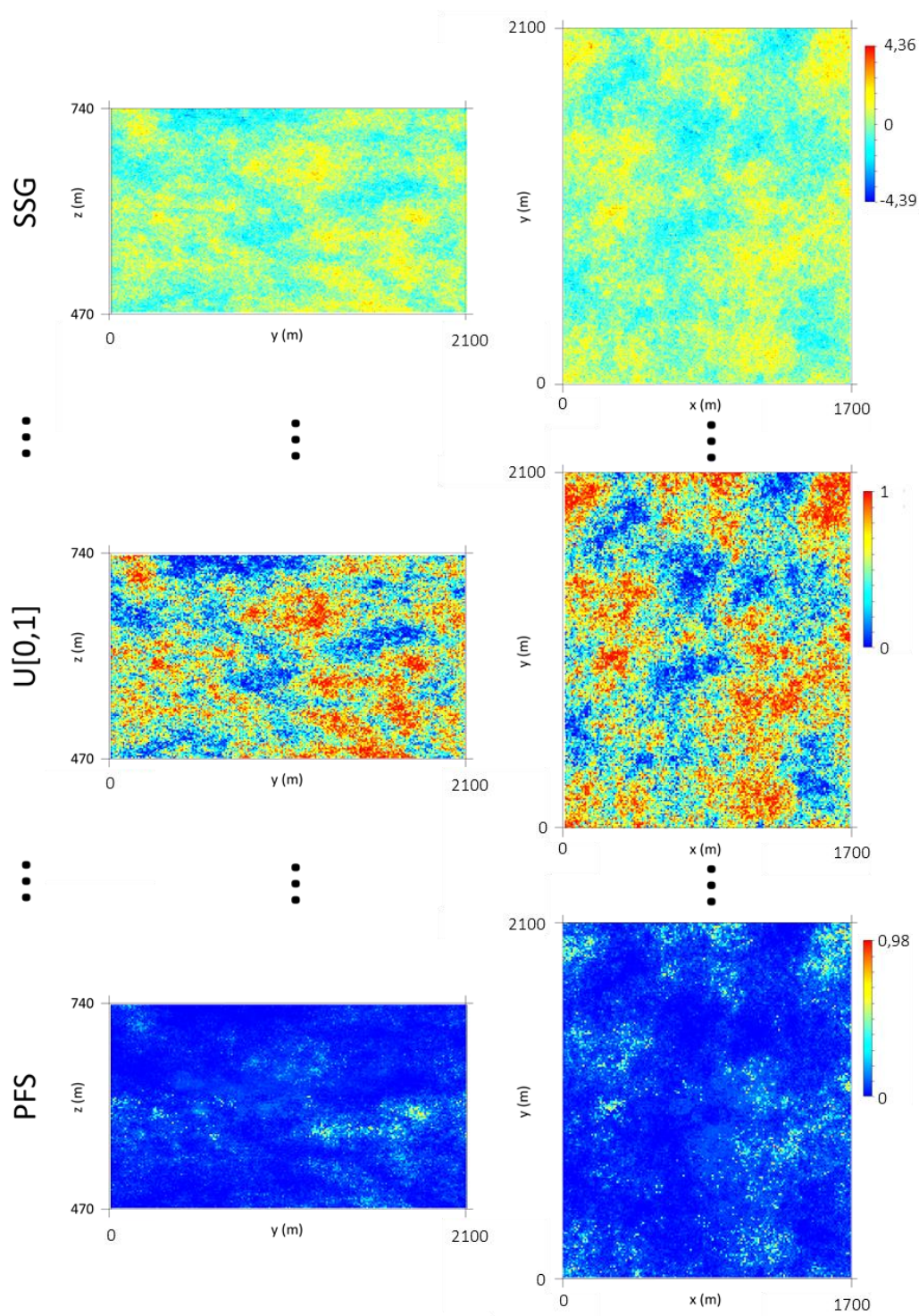


Figura 4.32 – Ilustração do procedimento da PFS: imagem de valores Gaussianos gerada por SSG #1, transformação para lei uniforme #1 e imagem de quantidade volframite gerada por PFS #1. Perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).

Na Tabela 4.15 comparam-se os estatísticos básicos da variável quantidade de volframite medida nos desmontes com o resultado final de uma realização de quantidade de volframite por PFS (#1).

Tabela 4.15 – Tabela de comparação dos estatísticos básicos entre a quantidade de volframite dos desmontes e a quantidade de volframite de uma imagem simulada por PFS.

Parâmetros		Dados iniciais	PFS #1
Nº de amostras		59047	4819500
Quantidade de volframite (kg/m <sup>3</sup> )	Média	0,046	0,045
	Variância	0,001	0,004
	Desvio Padrão	0,036	0,063
	Coeficiente de variação	0,79	1,37
	Mínimo	0,00	0,00
	Q1	0,016	0,01
	Mediana	0,046	0,03
	Q3	0,069	0,057
	Máximo	1	0,98
	Coeficiente de assimetria	2,38	4,429

Os resultados mostram que os limites máximo e mínimo praticamente mantêm-se assim como o valor da média. As maiores diferenças dizem respeito a mediana dos valores simulados que é francamente mais baixa assim como a variância e assimetria que são muito mais altas. Importa aqui referir que a simulação da quantidade de volframite, associada à estimação de probabilidades de pertença às classes, tem um efeito de desagregação dos dados e é precisamente nas zonas periféricas tanto lateralmente como na parte superior e inferior do depósito, onde predominam valores baixos, que este efeito se faz sentir de forma mais acentuada, gerando leis globais de quantidade de volframite mais encostadas à esquerda do que as leis globais originais.

No final das simulações, fez-se o agrupamento dos blocos na vertical para a malha final de 10x10x10 m, e calcularam-se a imagem média das simulações e a imagem do coeficiente de variação, das 1000 realizações de quantidade de volframite (Figura 4.33).

Pela análise da imagem média das realizações, pode-se perceber que a zona com quantidade de volframite mais elevada corresponde exatamente ao nível L2, seguindo-se do nível L1. A imagem dos coeficientes de variação revela a incerteza mais elevada nas zonas periféricas, como esperado, e menor no lugar dos desmontes, validando o processo de simulação, na medida em que as zonas amostradas contribuem para a estabilidade do modelo. No entanto, é evidente uma região de dispersão elevada na zona amostrada do nível L2, principalmente a Sudoeste, onde os dados de partida são heterogêneos, ou seja, existem discrepâncias entre valores muito próximos, forçando a simulação a gerar valores muito diferentes entre cada imagem. Outra particularidade do nível L2 é a existência de muitos valores elevados e baixos no histograma que condiciona a simulação.

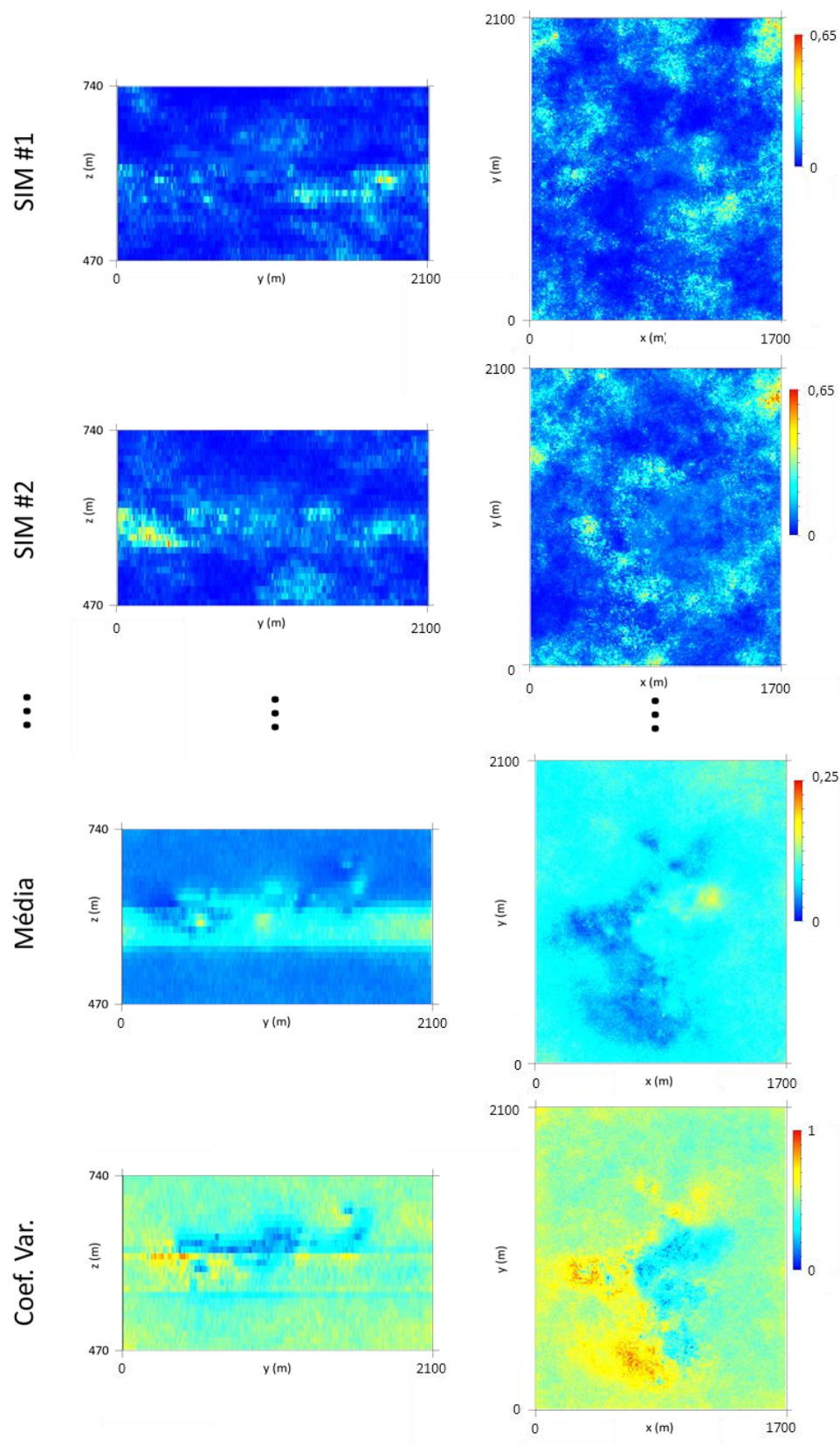


Figura 4.33 – Resultados finais do modelo de quantidade de volframite para a malha 10x10x10, perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).



A título meramente ilustrativo, na Figura 4.34 representa o modelo 3D da média das 1000 PFS realizadas e a Figura 4.36 a representação 3D dos coeficientes de variação em cada bloco (imagem da incerteza).

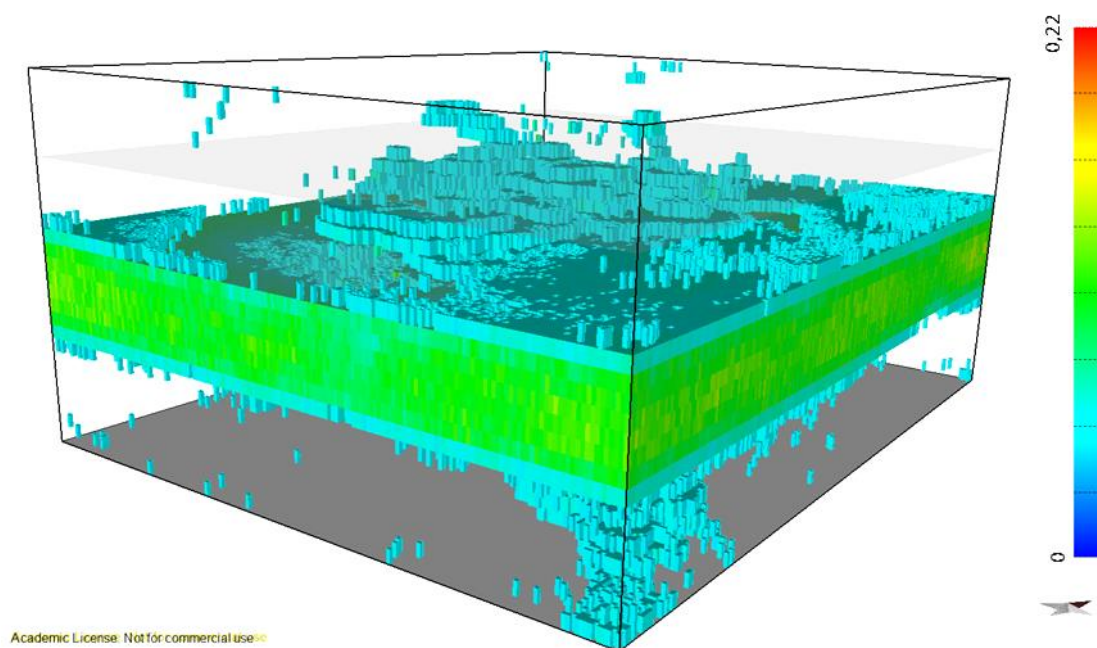


Figura 4.34 – Representação 3D dos valores médios de 1000 realizações de quantidade de volframite geradas por PFS.

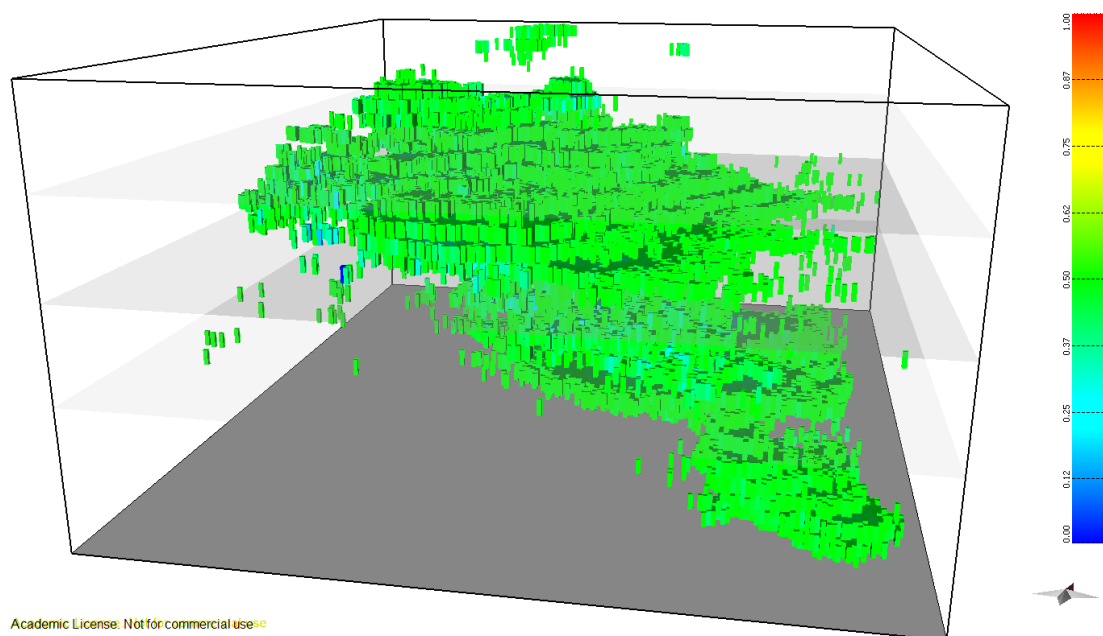


Figura 4.35 – Representação 3D dos coeficientes de variação calculados com base em 1000 realizações de quantidade de volframite geradas por PFS.

## 4.5 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL MINERAL DO DEPÓSITO

Os dados de quantidade de volframite apresentados e os resultados, por questões de confidencialidade, estão uniformizados para o intervalo [0, 1]. Por consequência, os resultados do presente capítulo encontram-se proporcionais à uniformização.

Depois de implementadas as metodologias de modelação da morfologia e da quantidade de volframite, e validados os resultados procedeu-se ao cruzamento dos dois modelos na malha 10x10x2 m, para cada uma das 1000 simulações, segundo a fórmula:

$$\text{Quantidade de Volfrâmio (kg)} = PF \times \text{quantidade de volframite} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times \text{volume do bloco}$$

Esta fórmula permite determinar a quantidade de volframite em quilogramas / toneladas em cada bloco por realização. Depois, estes valores são agrupados por soma para a malha de 10x10x10m e são convertidos numa imagem média e numa imagem de dispersão pelo coeficiente de variação. Na figura 4.36 mostram-se os resultados para a quantidade de volframite em kg.

Analisando da imagem média do potencial mineral (quantidade de volframite em kg) que resultam das imagens simuladas de *PF* e quantidade de volframite, percebe-se que a zona mais rica em volframite corresponde aos níveis L1 e L2, mais propriamente na zona central do modelo. Nestas zonas ocorre, simultaneamente, maior *PF* e quantidade de volframite e quando combinados resulta nas maiores quantidades em peso de minério.

As imagens dos coeficientes de variação refletem a maior incerteza nas zonas periféricas e a maior certeza nas zonas dos desmontes, tal como seria de esperar. Tal como nas variáveis *per si*, também observam-se regiões com CV elevados na zona amostrada, nos níveis com maior densidade de dados, principalmente na zona central do nível L2, onde os dados dos desmontes são heterogéneos. Observam-se ainda o contorno das regiões dos blocos da malha de 50x50x30 m que condicionaram o modelo com os dados das sondagens o que significa que o posicionamento dos dados das sondagens é transportado até ao modelo final.

Estas imagens da quantidade de volframite em peso são indicadas para quantificar o potencial mineral global e por níveis da mina, atribuindo um intervalo de incerteza. Estes quantitativos não excluem os montantes já explorados ao longo dos anos. Para este efeito, nas Figuras 4.37 e 4.38 representam-se as quantidades totais de volframite (em peso) em função da proporção de filão e a quantidade total de volframite em função da cota, respetivamente. Nestes gráficos são apresentadas a curva otimista (melhor cenário simulado), pessimista (pior cenário simulado) e a curva média das simulações.

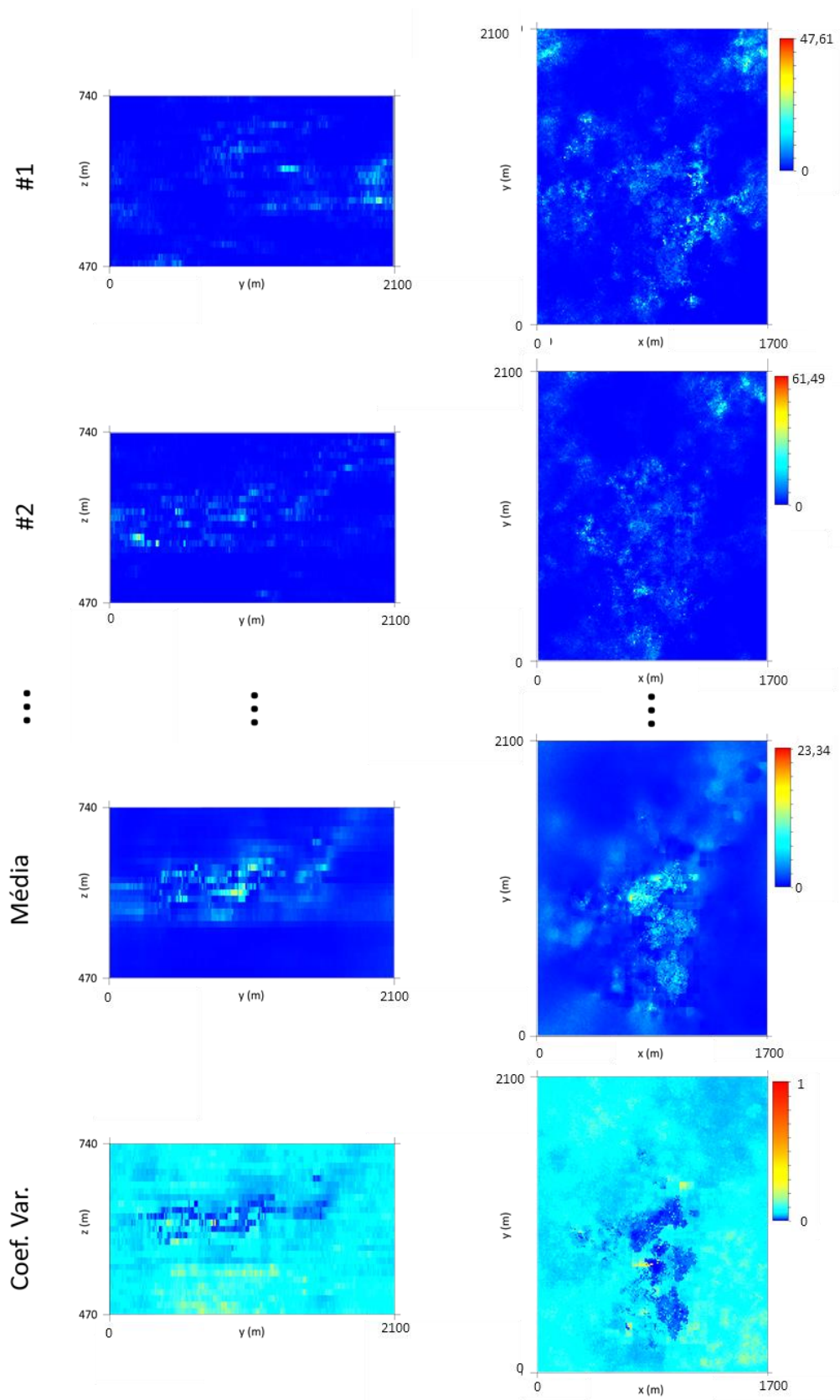


Figura 4.36 – Resultados do cálculo final de quantidade de volframate (kg) para a malha 10x10x10m, perfil YoZ (esquerda) e planta XoY (direita).



Da análise destas curvas perceber-se que o potencial mineral estimado do depósito é de 618,47 tons, sendo o valor mais otimista de 769,73 tons e o valor pessimista de 537.19 tons. Os valores apresentados não têm em consideração os volumes escavados do depósito e não representam a realidade, na medida em que são proporcionais à uniformização dos valores de quantidade de volframate, termos do acordo de confidencialidade.

As curvas de potencial mineral por cota indicam que o nível com mais potencial estimado é o L2, resultado previamente indicado pelos resultados da aplicação da metodologia dos da quantidade de volframate. A variabilidade dos resultados é elevada ao longo de toda a amplitude de cotas da mina, diminuindo nas transições entre alguns dos níveis simulados (L1-L2 e L2-L3).

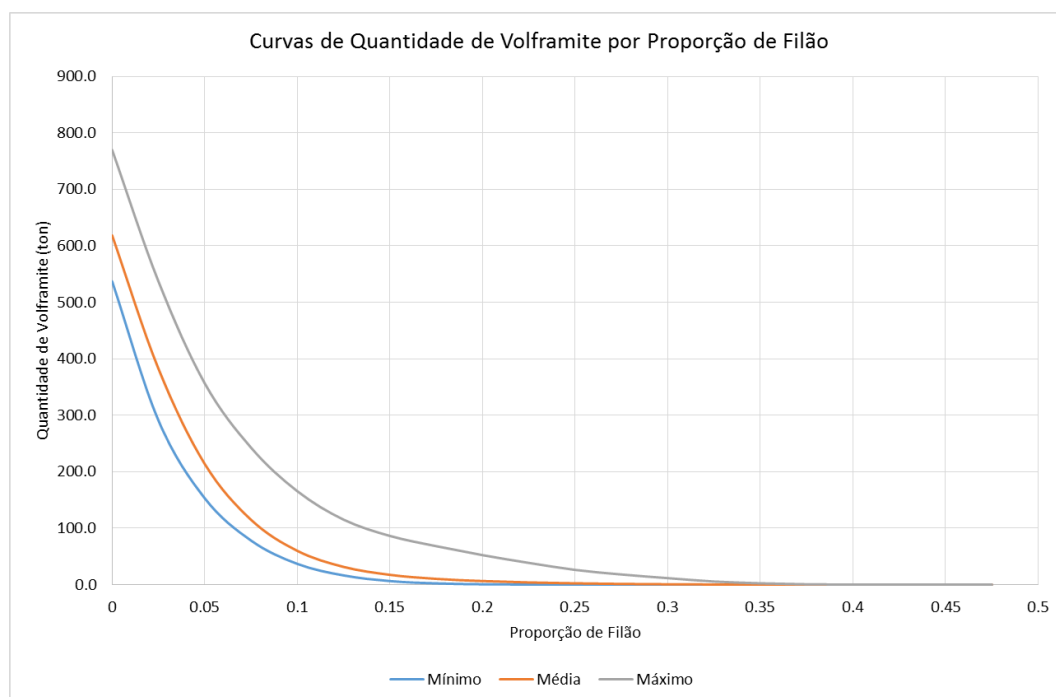


Figura 4.37 – Curvas da quantidade total de volframate (ton) por proporção de filão, onde estão representadas as curvas otimista (máximo das simulações), pessimista (mínimo das simulações) e a curva média.

Para terminar o caso de estudo, na Figura 4.39 representa-se o modelo 3D da média das 1000 imagens de quantidade de volframate (em peso kg). Estas imagens acumulam a informação da média e da incerteza das variáveis *PF* e quantidade de volframate.

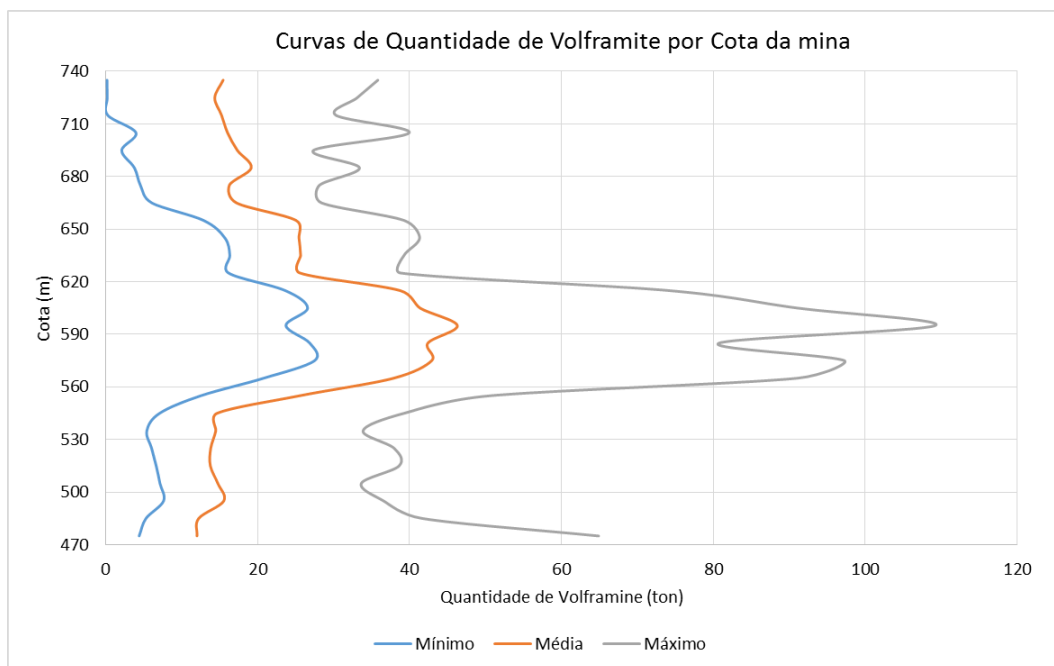
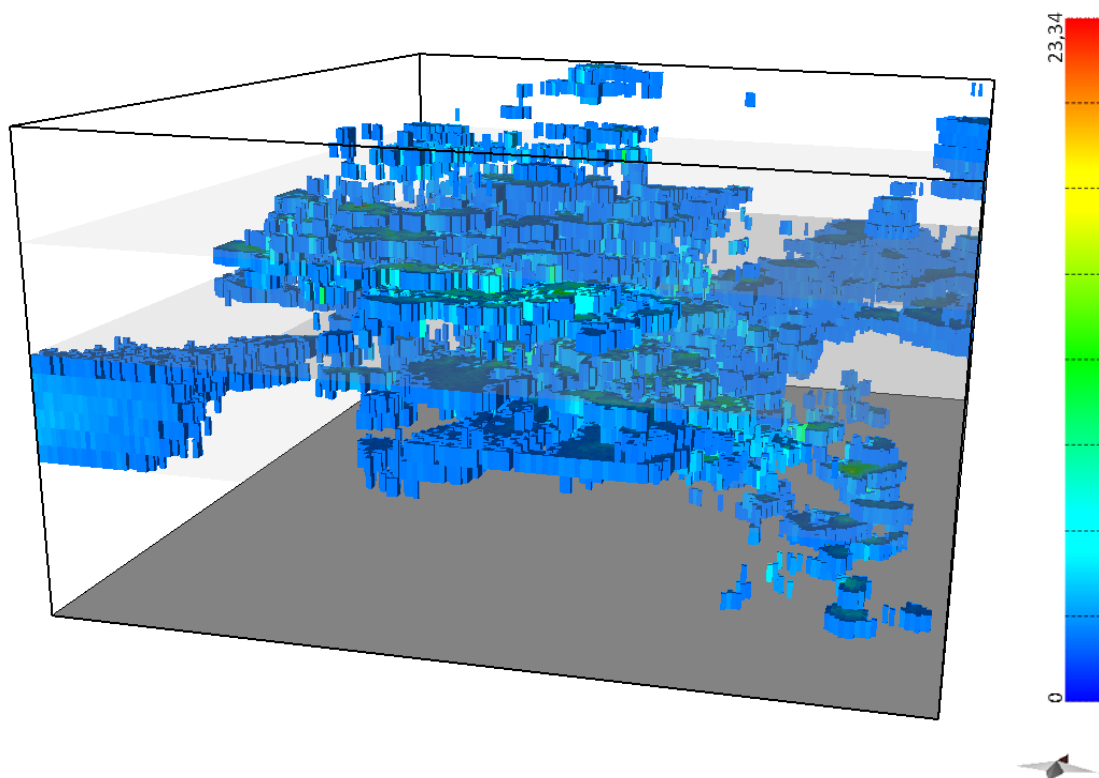


Figura 4.38 – Curvas relativas à quantidade total de volframite (ton) por cota da mina.



Academic License: Not for commercial use

Figura 4.39 – Representação 3D da imagem da média das quantidades de volframite (kg) por bloco de 10x10x10m.

## 5. CONCLUSÕES

A metodologia definida para a construção do modelo geológico do depósito mineral teve em conta a utilização de todos os dados disponíveis, provenientes de desmontes e sondagens, considerando-se que estes têm suportes, informação associada e tendenciosidade espacial distintos. Estas características particulares dos dados revelaram a impossibilidade de aplicação dos métodos geoestatístico convencionais, levando à necessidade de desenvolver e adaptar os dados e métodos consoante as condicionantes de cada modelo.

Ao abordar o problema, levantaram-se algumas premissas, que se revelaram o maior desafio do trabalho, nomeadamente, a diferença de suportes de medição dos dados disponíveis, qual a informação, ou suporte, a definir como primário ou secundário, qual o suporte mais representativo do comportamento do fenómeno, o enviesamento das variáveis durante a medição e entre si, a existência de informação contínua e categórica e finalmente a adaptação das ferramentas geoestatísticas aos objetivos pretendidos.

Os modelos geoestatístico de estimação não correspondiam concretamente ao que era pretendido, na medida em que não possibilitam a conjugação de volumes de informação desta dimensão, com recurso a informação primária e secundária em suportes de dimensão diferente. Assim, optou-se pela simulação estocástica, cujos algoritmos são mais facilmente adaptáveis às necessidades do problema e, simultaneamente, permitem quantificar a incerteza local de uma propriedade mediante a proximidade das amostras e o grau de heterogeneidade, estas características assumem um papel fundamental na compreensão dos resultados.

A metodologia proposta tem em conta a conjugação das questões apresentadas e permitiu a construção de dois modelos independentes, morfologia e quantidade de volframite, cruzados *a posteriori* de forma a quantificar o potencial mineral (ton) por bloco da mina. A informação disponível é integrada nos modelos, umas vezes com o papel de principal (desmontes), outras vezes com o papel de secundária (sondagens).

A integração de alguns dados ou suportes como informação secundária, revelou-se uma opção válida e eficaz na definição das metodologias, na medida que permitiu a criação de um modelo, condicional à estrutura espacial e estatísticas das sondagens tidas como mais representativas do volume em estudo comparativamente à informação dos desmontes. Mesmo que a informação secundária seja menos abundante em alguns locais do depósito, esta é globalmente menos enviesada do que a dos desmontes, logo é mais representativa do comportamento real da propriedade.

A análise univariada das variáveis de entrada permitiu assumir que:

- Existe uma enorme discrepância ou enviesamento de amostragem, de cerca de 7x, entre as medições de possanças nos desmontes  $PF^d$  e nas sondagens,  $PF^s$ ;

- Os níveis L1 e L2 são os mais ricos em volframite;
- Na variável classe de quantidade de volframite observada nas sondagens predominam as observações de classe 0 e 1 da variável categórica.

O enorme enviesamento da amostragem da variável possança dos filões entre desmontes e sondagens é justificado devido à exploração e execução das galerias de prospecção serem condicionadas pela presença de filão, o que nas sondagens não se verifica dado a furação ser feita em contínuo.

- A construção do modelo morfológico envolveu a modelação da variável regionalizada Proporção de Filão (PF) numa malha compatível com a estrutura da mina (10x10x10m), condicionando os resultados à média desagrupada dos valores das sondagens (não enviesado), e envolvendo também os dados dos desmontes.

Na fase previa de construção do modelo morfológico, e que ajudou a definir a metodologia que acabou por ser utilizada, foi possível concluir que:

- Os quantitativos de possança nas sondagens e desmontes apenas podiam ser trabalhados em conjunto se fosse calculada para as sondagens a possança acumulada para troços de 2,2 m, e neste suporte os dados das sondagens não apresentavam variograma;
- Os dados das sondagens apenas evidenciam variogramas se forem regularizados, apoiados por uma malha de blocos com 50x30x30 m;
- Os variogramas dos dados dos desmontes são muito bons;
- Uma justificação plausível para apenas se encontrar variogramas nas sondagens para grandes blocos, está relacionada com a ocorrência de duas estruturas de variograma desta variável e a distância mínima entre sondagens só captura uma parte da segunda estrutura.

A simulação da variável PF que constitui o modelo morfológico é condicional à informação e estrutura de variograma dos desmontes (informação tida como principal), à estatística desagrupada das sondagens e aos próprios valores das sondagens estendidos para valores médios numa região envolvente com 50x50x30m (informação tida como secundária).

Do modelo morfológico final pode-se concluir que:

- A zona de filões mais possantes coincide com a região central do depósito e com os níveis L1 e L2;
- A incerteza local do modelo é maior nas zonas periféricas, como esperado, e é nula no lugar dos desmontes, validando o processo de simulação, na medida em que todas as imagens geradas respeitam a informação de partida dos desmontes e das sondagens, esta última sob uma janela de influência. A ocorrência pontual de valores do coeficiente de variação elevados nas zonas mais amostradas pode justificar-se pelas diferenças de valores entre amostras muito

próximas, forçando a simulação a gerar valores muito diferentes entre cada imagem e pelo efeito da correção das médias que se acumula ao anterior;

- O variograma da simulação apresenta discrepâncias relativamente ao de partida (desmontes), devido à aplicação da correção dos valores (fase 1 SSD) que aumenta a discrepância entre informação próxima espacialmente, distorcendo o variograma. De facto a estimativa de variograma obtida pela variável PF dos desmontes deverá ser maior do que o real, e na realidade o modelo final aproxima-se do variograma que é estimado com os dados das sondagens.

Do cálculo das curvas de volume de filão obtém-se que:

- Não existem blocos simulados com mais de 40% de filão;
- O volume total de filão obtido pela média das simulações na região do modelo é estimado em  $13,7 \text{ Mm}^3$ , o que dá uma proporção média de 0,0142 (1,42% do volume);
- O volume total de filões decresce muito rapidamente quando o valor de corte de PF aumenta mesmo que ligeiramente, o que está de acordo com as pequenas possanças dos filões;
- O nível com maior volume de filão é o L1.

Os dados amostrais de PF estão concentrados na zona central do modelo e o número de amostras é muito mais reduzido no topo e na base do depósito. A simulação cobre um volume da mina mais extenso do que os dados dos desmontes mas as sondagens exibem valores baixos ou nulos nesses locais e por isso os valores são tendencialmente mais baixos nas zonas não amostradas por desmontes, este fenómeno anula a tendência do aumento da PF em profundidade (análise univariada).

Ao contrário da informação de partida do modelo morfológico, as variáveis quantidade de volframite nas sondagens e desmontes são distintas, tendo sido necessário propor uma metodologia adequada, estabelecendo-se, então, o objetivo de simular a quantidade de volframite condicionada à informação medida nos desmontes e classes de quantidade de volframite reportadas nas sondagens.

A informação dos desmontes não é colocalizada com a das sondagens, mostrou-se assim necessário cruzar a informação baseada na seleção das amostras mais próximas entre sondagens e desmontes. Também o número de classes de quantidade de volframite era muito elevado e existiam classes com percentagens residuais, pelo que o ideal era reduzir as classes para duas com a condição destas exibirem a melhor discriminação possível da quantidade de volframite. Concluiu-se que o grau de discriminação da quantidade de volframite entre as classes é baixo mas também era mais evidente para alguns níveis da mina do que para outros. O melhor cenário foi agrupar as classes 0, 1 e 2, e fazer a simulação condicional aos histogramas das classes por nível. A falta de correlação entre a quantidade de volframite medida e as classes é justificada por existir, possivelmente, diferentes metodologias para a classificação de classes de quantidade de volframite nas sondagens, demasiada aleatoriedade na

ocorrência da volframite nos filões que é mal capturada pelas sondagens, e também porque as duas fontes de informação não são colocalizadas.

Os variogramas da quantidade de volframite simulados mostraram-se semelhantes, com pequenas discrepâncias, em todas as direções calculadas, facto justificado pelo variograma da quantidade de volframite ser calculado e ajustado para o conjunto total dos dados e a simulação condicional da quantidade de volframite às duas classes ser feita em separado. O efeito da simulação também se manifesta nos estatísticos, visto que a simulação de quantidade de volframite, associada à probabilidade de pertencer a diferentes classes, resulta numa desagregação dos dados, que se manifesta, com maior evidência, nas zonas periféricas, superior e inferior do modelo onde os valores são predominantemente mais baixos, aumentando a dispersão e a assimetria das leis de distribuição regionais, por nível, de partida.

Ao condicionar a quantidade de volframite simulada aos histogramas de cada nível proporciona-se um aumento da coerência dos resultados, principalmente por que grande parte da área simulada encontra-se longe dos desmontes e existe de forma evidente segregação da quantidade de volframite em profundidade.

Pela análise do modelo final de quantidade de volframite pode concluir-se que:

- A zona com quantidade de volframite mais elevada corresponde exatamente ao nível L2, seguindo-se do nível L1;
- O coeficiente de variação do conjunto das simulações (medida de incerteza) comporta-se de forma semelhante aos resultados do modelo morfológico. No nível L2 a maior dispersão justifica-se pela heterogeneidade dos dados, principalmente, na existência de muitos valores elevados e baixos no histograma que condiciona a simulação.

Finalmente, o cruzamento dos dois modelos simulados da morfologia e quantidade de volframite permitiu obter um modelo de potencial mineral da área estudada. Estes resultados mostram que:

- A zona mais rica em volframite corresponde aos níveis L1 e L2 (zona central do modelo);
- Na representação dos coeficientes de variação, observam-se valores altos na zona periférica e em alguns blocos na zona central amostrada (heterogeneidade dos dados). Observa-se pontualmente o contorno dos blocos 50x50x30m significando que a informação das sondagens é transportada até ao modelo final;
- A quantidade total média de volframite estimada do depósito são 618,47 tons, revelando-se em 769,73 tons no horizonte mais otimista e em 537,19 tons no oposto;
- As curvas de potencial mineral por cota indicam que o nível mais rico é o L2, mantendo a tendência observada no modelo de quantidade de volframite.

Esta abordagem apresentada revelou-se totalmente adequada para a integração de dados de sondagens e desmontes, com suportes, informação registada e tendenciosidade espacial distintas. Todavia é um modelo geológico e, por definição, uma previsão, e como tal tem simplificações e erros associados.

A execução do trabalho e a análise dos resultados das diferentes metodologias sugerem que se façam os seguintes estudos adicionais em trabalhos futuros:

- Revisão da Base de Dados das sondagens de forma a detetar se existem incorreções de posicionamento de alguns registos. Este procedimento pode anular/diminuir a degradação da correlação entre os registos na horizontal e assim reduzir a malha dos 50x50x30m. É convicção que um eventual número mesmo que muito reduzido de incorreções deste tipo tenha grandes consequências na correlação espacial;
- Incorporar a correção local para as médias das sondagens no algoritmo da SSD, evitando que esta correção se faça *a posteriori*. O algoritmo respeitaria a informação das sondagens logo nos resultados gerados, assim, tornava-se possível anular o efeito de degradação da correção dos valores no variograma inicial;
- Efetuar um estudo de medição da quantidade de volframite numa área definida e menor da mina, com o objetivo de adensar a malha de amostragem da variável nas duas direções, horizontal e vertical. Este estudo possibilitaria diminuir o efeito de pepita de 30% dos variogramas da quantidade de volframite e assim, aumentar a qualidade do modelo, mediante a redução da variabilidade da quantidade de volframite simulada.





## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, A., & Journel, A. (1994). Joint Simulation of Multiple Variables with a Markov-Type Coregionalization Model. *Mathematical Geology*, 26(5), 565 - 588.
- Almeida, J., Soares, A., Reynaud, R. (1993). Modelling the Shape of Several Marble Types in a Quarry. *Proceedings of the XXIV International Symposium APCOM, Montreal*, vol. 3: 452–459.
- Almeida, J (2010). Modelling of cement raw material compositional indices with direct sequential cosimulation. *Engineering Geology* 114 (1), 26-33
- Almeida, J., & Ferreira, A. (2011). Técnicas geoestatísticas para modelação 3D de depósitos minerais de pegmatitos litíferos. In L. Martins, D. Oliveira, R. Silva, H. Veigas, & R. Bôas, *Valorização de Pegmatitos Litíferos* (pp. 35 - 38). Lisboa: DGEG/LNEG/ADI/CYTED.
- Almeida, J. & Roxo, S. (2014). Uso de informação sensorial para melhorar o mapeamento de teores em TPH em solos. *IX CNG/2º CoGePLiP, Comunicações Geológicas*, 101, pp. 951-954. Porto.
- Antão, A. (2001). Os recursos minerais na Beira Baixa - Mineral resources of Beira Baixa (Portugal). *Geonovas*, 15, 45-59.
- Cassiraga, E., & Gómez-Hernández, J. (2001). Probability Field Algorithm for Multivariate Conditional Simulation. In *geoENV III - Geostatistics for Environmental Applications* (pp. 275-285).
- Charifo, G. (2008). Caracterização e Avaliação de Reservas Geológicas do Depósito Mineral de Farim-Saliquinhé. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica (Georrecursos), Universidade Nova de Lisboa. (82pp.)
- Charifo, G., & Almeida, J. (2010). Caracterização e avaliação de reservas geológicas do depósito mineral de Farim-Saliquinhé. *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 63(3), 569-580.
- Charifo, G. (2012). Modelação de depósitos minerais amostrados por suportes irregulares. O caso de estudo do depósito de Farim-Saliquinhé na Guiné-Bissau. Tese de Doutoramento em Engenharia Geológica, Universidade Nova de Lisboa. (135 pp.)
- Charifo, G., Almeida, J., & Ferreira, A. (2013). Managing borehole samples of unequal lengths to construct a high-resolution mining model of mineral grades zoned by geological units. *Journal of Geochemical Exploration*, 132, 209 - 223.

- Charifo, G., Almeida, J., & Ferreira, A. (2014). Modelação geológica do depósito mineral de Farim-Saliquinhé amostrado por sondagens de comprimento variável. IX CNG/2º CoGePLiP, Comunicações Geológicas, 101, pp. 1409-1413. Porto.
- Conde, L., Pereira, V., Ribeiro, A., & Thadeu, D. (1971). Jazigos Hipogénicos de Estanho e Volfrâmio. I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica (p. 81). Lisboa: Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos.
- European Commission (2014). Report on Critical raw materials for the EU. Technical Report, European Commission (Enterprise and Industry), Brussels, Belgium.
- Ferreira, N., Iglésias, M., Noronha F., Pereira E., Ribeiro A., Ribeiro, M.L. (1987). Granitoides da zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: Bea, F., Carmina, A., Gonzalo, J.C., Plaza, M.L., Rodrigues, J.M.L. Geologia de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico. Libro Homenaje a L. C. G. Figueirola, Editorial Rueda, Madrid, 37-53.
- Foxford, K. A., Nicholson, R., Polya, D. A. & Hebblethwaite, R. P. B (2000). Extensional failure and hydraulic valving at Minas da Panasqueira, Portugal: evidence from vein spatial distributions, displacements and geometries. *Journal of Structural Geology*, 22(8), p. 1065-1086.
- Franco, A., Vieira, R., & Bunting, R. (2014). The Panasqueira Mine at a Glance. *Tungsten newsletter*, 16.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford University Press.
- Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, New York. 561p.
- Kelly, W., & Rye, R. (1979). Geologic, fluid inclusion, and stable isotope studies of the tin-tungsten deposits of Panasqueira, Portugal. *Economic Geology*, 74, 1721-1822.
- Lourenço, A. (2002). Paleofluidos e mineralizações associadas às fases tardias da Orogenia Hercínica. Tese de Doutoramento em Geologia, Universidade do Porto, Porto. (326pp.)
- Lourenço, A. (2008). *As Minas da Panasqueira*. Centro de Geologia da Universidade do Porto, Porto.
- Marignac, C. (1973). Métallogénie : analyse structurale de l'environnement du gisement à tungstène-étain de Panasqueira, Beira-Baixa, Portugal : implications génétiques. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, serie D*, 277, 269-272.
- Martins, L. (2012). *Mineral Resources of Portugal*. Direcção Geral de Energia e Geologia.
- Matheron, G. (1971). The Theory of Regionalized Variables and Its Applications. In *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau* (Vol. 5, p. 218). École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

- Matias, F. V. (2010). Modelação 3D de um Subsector das Mineralizações Auríferas de Casas Novas, Montemor-o-Novo. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica (Georrecursos), Universidade Nova de Lisboa. (121pp.)
- Matias, F. V., Almeida, J. A. & Chichorro, M. (2015). A Multistep Methodology for Building a Stochastic Model of Gold Grades in the Disseminated and Complex Deposit of Casas Novas in Alentejo, Southern Portugal. *Resource Geology* 65 (4), 361–374.
- Neiva, J. (1944). Jazigos portugueses de cassiterite e de volframite. *Comum. Serv. Geol. de Portugal, Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos de Portugal*, 25.
- Noronha, F., Doria, A., Dubessy, J., & Charoy, B. (1992). Characterization and timing of the different types of fluids present in the barren and ore-veins of the W-Sn deposit of Panasqueira, Central Portugal. *Mineralium Deposita*, 27, 72-79.
- Noronha, F. (1999). Jazigos filonianos hidrotermais de estanho e volfrâmio. Considerações acerca da sua génese. 1º Colóquio "Jazigos minerais metálicos de Portugal" (pp. 1-19). Lisboa: Academia das Ciências de Lisboa.
- Oliveira, L. (2005). Avaliação do uso da perfilagem geofísica para obtenção de informações secundárias para utilização em co-estimativas de variáveis geológico-mineiras. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Pinto, F. (2014). Estudo da distribuição do Estanho na Mina da Panasqueira. Dissertação de Mestrado em Geologia, Universidade do Porto, Porto.
- Pinto, F., Vieira, R., Ferraz, P., & Noronha, F. (2014). Estudo da distribuição espacial do Sn no Jazigo de W-Sn(Cu). *Comunicações Geológicas, ACTAS DO IX CNG/2º CoGePLiP(Especial II)*, 829-832.
- Ribeiro, A., & Pereira, E. (1982). Controles paleogeográficos, petrológicos e estruturais na génese dos jazigos portugueses de estanho e volfrâmio. *Geonovas*, 1(3), 23 - 31.
- Ribeiro, L., & Gonçalves, A. (2013). Contributo Para o Conhecimento Geológico e Geomorfológico da Área Envolvente do Couto Mineiro da Panasqueira. *Geografia e Ordenamento do Território, Revista Eletrónica*, 3, 93-116.
- Rodrigues, A. (2013). Modelação 3D de teores de depósitos minerais condicionados por tipos de mineralização. O caso de estudo do depósito mineral do Zambujal, Minas de Neves-Corvo. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica (Georrecursos), Universidade Nova de Lisboa. (70pp.)
- Rossi, M.E. & Deutsch, C.V. (2014). *Mineral Resource Estimation*. Springer, New-York, 326p.

- Silva, D & Almeida, J (2015). The use of rock density for improving morphological and metal grade models of the Zambujal sulphide ore deposit (Neves–Corvo Mine). Proceedings of the 17th Annual Conference of the IAMG, Freiberg, Germany.
- Simões, T. (2014). Modelação automática 2D de mineralizações filonianas - aplicação às Minas da Panasqueira. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica (Georrecursos), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Soares, A. (2001). Direct Sequential Simulation and Cosimulation, Mathematical Geology.
- Soares, A. (2006). Geostatística para as Ciências da Terra e do Ambiente (Geostatistics for Earth and Environmental Sciences). Lisboa: Instituto Superior Técnico Press.
- Sousa, M.B. (1984). Considerações sobre a estratigrafia do Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) e a sua relação com o Paleozóico Inferior. Cuadernos de Geología Ibérica, 9, 9-36.
- Srivastava, R., & Froidevaux, R. (2004). Probability Field Simulation: A Retrospective. In Quantitative Geology and Geostatistics (Vol. 14, pp. 55-64).
- Thadeu, D. (1951). Geologia do Couto Mineiro da Panasqueira. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, tomo XXXII, 64.
- Thadeu, D. (1965). Características da mineralização hipogénica estano-volframítica portuguesa. Boletim da Ordem dos Engenheiros, 10(1), 61-81.
- Thadeu, D. (1979). Le gisement stannio-wolframifère de Panasqueira (Portugal). In Chronique De La Recherche Minière (pp. 35-42).
- Valente, S., & Figueiredo, E. (2008). Feridas abertas na terra: da degradação dos sítios mineiros à sua recriação patrimonial - o caso das Minas da Panasqueira. Coimbra: Colóquio Ibérico de Estudos Rurais - Cultura, Inovação e Território.
- Williams, C. (1985). Ore Estimation and Mine Planning at Panasqueira, Portugal. Tese de Doutoramento, Royal School of Mines, London. (301pp.)
- Yamamoto, J. K. (1991). Comparação de métodos computacionais para avaliação de reservas: Um estudo de caso na jazida de cobre de Chapada, Go. Tese de Doutoramento, Universidade de São Paulo, São Paulo. (175pp.)